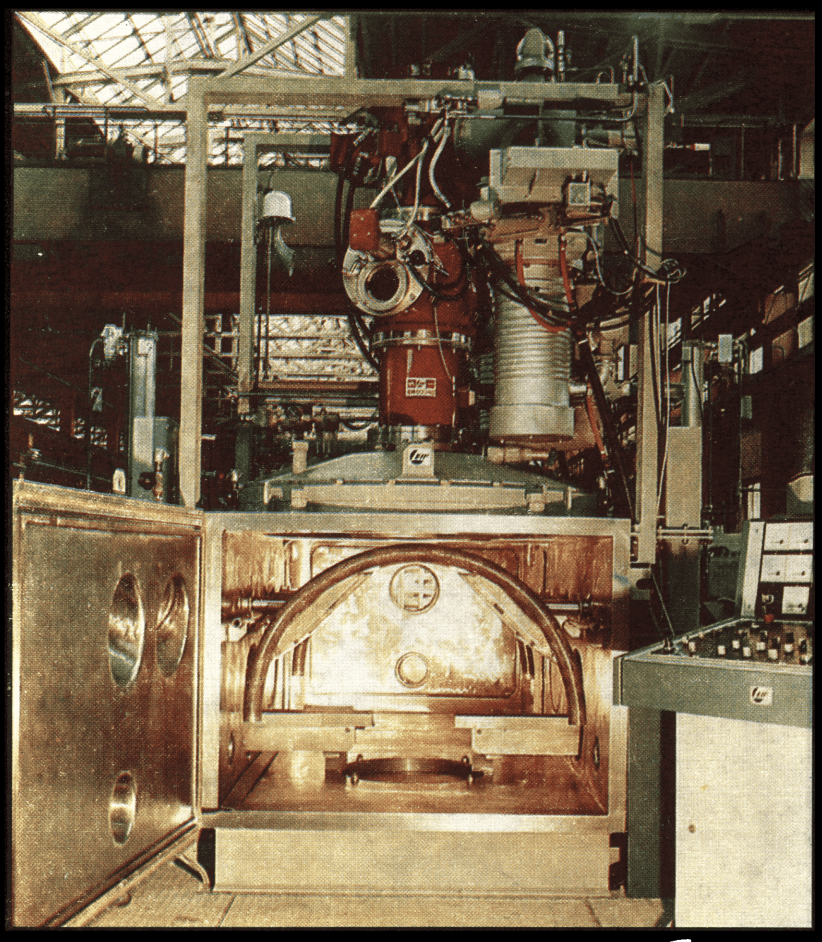
ELEKTRIE 12|86

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399

Elektronenstrahltechnik



im Export

Die Stellung der CIGRE im Rahmen anderer internationaler Organisationen

Die CIGRE — ein Weltkongreß, der sich wesentlichen Fragen und Problemen bei der Gestaltung, des Betriebes und der Ausrüstung großer Elektroenergiesysteme zuwendet, kann auf eine erfolgreiche Tradition verweisen. Mit kontinuierlich wachsendem Erfolg sind Wissenschaftler und Ingenieure seit 65 Jahren von allen Kontinenten unserer Erde bemüht, die vielfältigen Erfahrungen bei den nationalen und internationalen Übertragungssystemen auszutauschen. Eine wesentliche Aufgabe der CIGRE und deren Arbeitsgremien besteht auch darin, die Grundlagen für einheitliche, weltweit verständliche Beziehungen, Bewertungs- und Prüfregeln für Teilprozesse zu erarbeiten. Die Mehrzahl der so geschaffenen abgestimmten Richtlinien bzw. Erkenntnisse zu allgemein interessierenden Entwicklungsprozessen wird entweder in der CIGRE-eigenen Fachzeitschrift „Electra" veröffentlicht oder auch an die zuständigen internationalen Organisationen für die Standardisierung bzw. für die Herausgabe von Publikationen für die Bemessung und die Prüfung der entsprechenden Ausrüstungen weitergeleitet. Die Kooperationen zwischen der CIGRE und der IEC, aber auch der ITTCC, CCIR als auch der ISO und CISPR sind besonders intensiv. Die weltweite Anerkennung der Publikationen der IEC als das Standardwerk der Elektrotechnik findet ihren Ausdruck darin, daß die Mehrzahl der Industrieländer der Welt dieses wörtlich als staatlichen Standard bzw. als Norm-Empfehlungen übernommen haben und dieses als Qualitätsbasis bei Vertragsgestaltungen anwenden. Die Vielfalt der Kooperationsbeziehungen der CIGRE ist deutlich aus Bild 1 zu sehen. Die Dicke der Pfeile soll als Maß für die Intensität der Beziehungen verstanden werden.

Schon seit vielen Jahren wird seitens der CIGRE angestrebt, die Entwicklungsländer in den weltweiten Erfahrungsaustausch einzubeziehen. Das im November 1985 veranstaltete weltoffene Symposium in Dakar/Senegal zum Thema „Die Probleme bei der Elektrifizierung von Entwicklungsländern" war ein großer Erfolg. Als assoziiertes Mitglied zu den Gremien der UNO, aber auch in enger Kooperation mit der UPDEA (Union of Producers, Conveyors and Distributors of Electric Energy for Africa) wurde durch diese Veranstaltung in eindrucksvoller Weise eine Form der Hilfe und Unterstützung der Entwicklungsländer bei der Lösung ihrer sehr komplizierten Probleme durch die CIGRE demonstriert. Die Suche nach neuen Formen von Veranstaltungen in weit entfernten Kontinenten mit Unterstützung der CIGRE oder in deren Namen soll die Kontinuität der Förderung dieser Länder beim Aufbau und Ausbau speziell von Elektroenergiesystemen unterstreichen.

Schwerpunktthemen der CIGRE-Gremien im Jahre 1986

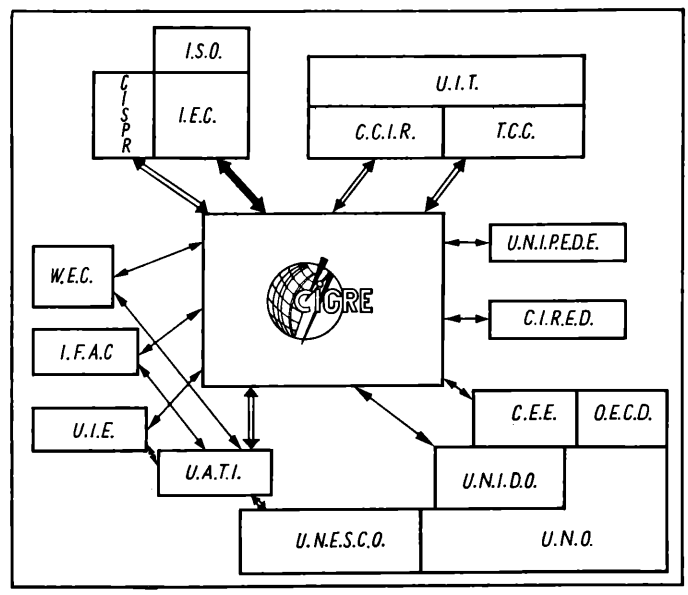
Zur Erreichung einer zielgerichteten Diskussion im Rahmen der Sessionen werden durch die 15 Forschungskomitees sogenannte „bevorzugte Themen" erarbeitet und rechtzeitig veröffentlicht, so daß sowohl die etwa 180 CIGRE-Berichte thematisch orientiert sind als auch entsprechende Diskussionsbeiträge vorbereitet werden können. Es hat sich bewährt, wenn jedes Forschungskomitee maximal 3 bevorzugte Themen nennt. Bei der Einführung neuer Technologien ergeben sich naturgemäß Probleme, die gleichzeitig in mehreren Forschungskomitees Auswirkungen zeigen. Im Folgenden sollen einige solcher Vorzugsthemen der 31. Session ausgewählt werden, die in mehrere Sachgebiete eingreifen und deshalb auch ein sehr breites Interesse fanden:

1. Die „Technische Diagnostik" nimmt in allen SC's einen breiten Raum ein, in denen über Geräte- oder Anlagensysteme diskutiert wird. Die Technische Diagnostik soll helfen,
   - eine funktionsbedingte Bewertung
   - Alterungserscheinungen, auch bei häufiger Grenzbelastung oder bei Überlastung
   - Auswirkungen extremer äußerer Belastungen für die sehr kostspieligen Ausrüstungen

   zu ermöglichen bzw. zu erkennen. Dabei wird den Methoden, die während des Betriebes eine sichere Aussage ermöglichen, der Vorrang gegeben.
2. Der Einsatz neuer Isolierstoffe, insbesondere zellulosefreie Stoffe oder technische Gase (SF_6) anstelle von Öl, nicht nur in Schaltgeräten und Anlagen sondern auch in Wandlern und Transformatoren.
3. Die Gleichstrom-Übertragungstechnik wird nicht mehr einseitig für die verlustarme Energieübertragung über lange Strecken betrachtet, sondern in weit stärkerem Maße für Netzkupplungen. Damit ergeben sich Aufgaben an die Schalttechnik, den Überspannungsschutz, der Bemessung der Isolatoren (auch bei Schmutz) und daraus wiederrum umfangreiche Aufgaben für die gesamte Prüftechnik.
4. Die Einführung neuer Technologien (Mikroelektronik und Lichtleittechnik)

Fortsetzung 3. Umschlagseite

Bild 1.
Die CIGRE und ihre gegenwärtigen internationalen Kooperationsbeziehungen



I.E.C.	International Electrotechnical Commission	**C.E.E.**	Commission Economique pour l'Europe
C.I.S.P.R.	Comité International Special des Perturbations-Radioélectriques	**O.E.C.D.**	Organisation for Economic Co-operation and Development
	Committee on Radio Inteférence	**U.N.I.D.O.**	United Nations Industrial Development Organisation
I.S.O.	International Organisation for Standardisation	**U.N.O.**	United Nations Organisation
U.I.T.	Union Internationale des Télécommunications	**U.N.E.S.C.O.**	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
C.C.I.R.	Comité Consultatif International des Radiocommunications	**U.A.T.I.**	Union des Associations Techniques Internationales
ITTCC	International Telegraph an Telephone Consultative Committee	**U.I.E.**	Union Internationale d'Electrothermie
U.N.I.P.E.D.E.	Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique	**I.F.A.C.**	International Federation of Automatic Control
C.I.R.E.D.	Congrés International des Réseaux Electriques de Distribution	**W.E.C.**	World Energy Conference

12|86 ELEKTRIE

40. Jahrgang | Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik | ISSN 0013–5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Silberne Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. H.-J. Mau · Prof. Dr. phil. habil. G. Mierdel · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e.h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hanella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Neue LEW-Elektronenstrahlschmelzanlage EMO 600

Für einen internationalen Elektronikkonzern hat das Kombinat VEB LEW Hennigsdorf/DDR diese neue Anlage mit einer Leistung von 600 kW in nur 12 Monaten gefertigt. Diese Anlage wird speziell für das Erschmelzen von Reinsttantal und -niob eingesetzt.

Lesen Sie zu weiteren elektrotechnologischen Einzelfragen auch die Aufsätze von der 5. Fachtagung ELEKTROTECHNOLOGIE und von der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstoffkunde.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Aktuelle Information	442
Markov, H.; Martin, E. **Neue Maßstäbe auf dem Gebiet der Elektronenstrahltechnik zum Schmelzen und Bedampfen**	443
Persönliches	444
Fachaufsätze	
Hennig, K.; Richter, Edgar; Richter, Emil; Schmidt, A. **Oberflächenveredlung mittels Ionenstrahlen**	445
Zacharias, P.; Schiedung, H.; Reißmüller, R. **Leistungsmodulierbare elektronische Stromquelle für CO_2-Laser**	447
Scheibe, H.-J.; Musikowski, H.-D. **Gestaltung der Stromversorgungseinrichtung für Plasmaspritzanlagen**	449
Rudolph, W.; Hennig, K.; Niese, S. **Nukleare Analytik an metallischen Werkstoffen**	451
Budig, P.-K. **Der Einfluß der Verluste auf das zulässige Drehmoment stromrichtergespeister Asynchronmaschinen**	454
Beckert, U.; Neuber, W. **Theorie des dynamischen Verhaltens von Asynchronmotoren mit Hochstabläufer**	457
Muschick, E. **Elektroenergieübertragungstechnik bis zur Entscheidung für Drehstrom und ein nachträgliches Entscheidungsmodell[1)]**	460
Maksymiuk, J. **Zur Schnelligkeit von Schaltgeräten[1)]**	463
Rößner, E.; Wicht, H.; Marx, G. **Elektrische Entladungen in Elektrolytlösungen zur Bearbeitung und Behandlung metallischer Werkstoffe**	466
Umschau	
Die Stellung der CIGRE im Rahmen anderer internationaler Organisationen	2. US
Fachtagungen	471
Kurzberichte	473
Zeitschriften	475
Bücher	476

AKTUELLE INFORMATION

Die Technische Hochschule „Otto von Guericke" Magdeburg führt vom 1. bis 16. September 1987 die

Wissenschaftlichen Tage 1987

mit folgenden Veranstaltungen durch.

Einsatz der EDV in Bildung, Forschung und Entwicklung

11. Kolloquium Informatik

Zeit: 1. bis 4. September 1987
Veranstalter: Sektion Rechentechnik und Datenverarbeitung

Sektionen

1. Theoretische Grundlagen und allgemeingültige Methoden der Gestaltung automatischer Systeme der Informationsverarbeitung
   — Programmiersprachen, Methoden der Programmierung, Implementation von Programmiersystemen; Datenorganisation und Datenbanken; Rechnersysteme, Rechnernetze und verteilte Verarbeitung; Wissensverarbeitung.
2. Einsatz der Rechentechnik und Datenverarbeitung in Forschung und Entwicklung
   — Gerätesysteme und Basissoftware; grafische Software; Dialogtechnik; Fachsprachen; Datenbasen und Informationsbereitstellung
   Anwendungen: automatisierte Meßwerterfassung, Simulation diskreter Prozesse.
3. Die Informatik als Basiswissenschaft und konstruktive Ingenieurwissenschaft in der Aus- und Weiterbildung.
4. Einsatz der EDV zur Unterstützung der Leitung und Planung von Bildungs- und Forschungseinrichtungen.

Mathematik für die Praxis

20. Kolloquium Statistische Qualitätskontrolle

und

5. Tagung Industriemathematik

Zeit: 7. bis 9. September 1987
Veranstalter: Sektion Mathematik und Physik, Wissenschaftsbereich Operationsforschung; Sektion Rechentechnik und Datenverarbeitung, Wissenschaftsbereich Informationsverarbeitung in der technischen Vorbereitung und Sektion Technologie der metallverarbeitenden Industrie, Wissenschaftsbereich Qualitätssicherung und Fertigungsmeßtechnik in Verbindung mit der Mathematischen Gesellschaft der DDR, Bezirkssektion Magdeburg und der Kammer der Technik, Bezirksverband Magdeburg

Inhaltliche Schwerpunkte

— Problemanalyse und Problemfindung
— Erfassung, Quantifizierung und Bewertung von Einflußgrößen; Verfahrensentwicklungen bei der statischen Qualitätsbewertung; Optimierte rechnergestützte Prüfplanung; Statistische Qualitätsbewertung und -steuerung in automatisierten Fertigungsprozessen unter Einsatz optimierter Algorithmen; Modelle von Qualitätssicherungssystemen; Exakte und approximative Lösung von technischen und ökonomischen Problemen
— Beschreibung von Lösungsalgorithmen und Erfahrungen bei deren Realisierung
— Erprobung von mathematischen Modellen und ihrer Lösungsverfahren in der Praxis.

Anläßlich der 5. Tagung Industriemathematik in Magdeburg ist eine Computer-Grafik-Ausstellung vorgesehen.
Grafische Darstellungen wissenschaftlich-technischer Sachverhalte sind wesentliche Hilfsmittel im Kommunikationsprozeß Maschine — Mensch. Neben hoher Aussagekraft besitzen diese Grafiken oft Momente des Schönen und Phantastischen.
In dieser Ausstellung soll eine breite Palette dieser Computergrafiken gezeigt werden. Die Synthese von Phantasie und Technik soll die vielfältigen Möglichkeiten der Nutzung moderner Computertechnik in der Hand schöpferischer Menschen demonstrieren.
Senden Sie bitte bis zum 15. Juli 1987 Ihre Computergrafiken, die neue Möglichkeiten der Darstellung von Sachverhalten und bzw. oder von künstlerischen Strukturen zeigen an die

Sektion Mathematik und Physik, Wissenschaftsbereich Operationsforschung,
PSF 124
Magdeburg
3010

mit dem Stichwort „Computer-Grafik"; das maximale Format soll A 3 sein.
Eine Jury wird die besten und interessantesten Grafiken für die Ausstellung auswählen.

V. Symposium Zuverlässigkeit

Zeit: 9. bis 11. September 1987
Veranstalter: Interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Zuverlässigkeit" der Technischen Hochschule „Otto von Guericke"
in Verbindung mit der Kammer der Technik und der Mathematischen Gesellschaft der DDR

Inhaltliche Schwerpunkte

Durch Vorträge, Poster und Diskussionen sollen die seit dem IV. Symposium erreichten wissenschaftlichen Fortschritte und Erfahrungen aus der Zuverlässigkeitsarbeit vermittelt und die Wechselwirkung zwischen Theorie und Praxis auf diesem interdisziplinären Arbeitsgebiet verdeutlicht werden. Fragen der rechnergestützten Zuverlässigkeitsarbeit sind feste Bestandteile der folgenden Schwerpunkte des Tagungsprogramms:

— Zuverlässigkeit von Erzeugnissen
— Strategien, Methoden und Arbeitsmittel der Zuverlässigkeitsarbeit, einschließlich Instandhaltung
— Leitung, Planung und Organisation der Zuverlässigkeitsarbeit
— Mathematische Modellierung und ökonomische Bewertung der Zuverlässigkeit
— Modellierung und Beeinflussung von Schädigungsprozessen
— Technische Diagnostik und Schadensbekämpfung.

X. Gesellschaftswissenschaftliches Kolloquium

Zeit: 15. und 16. September 1987
Veranstalter: Sektion Marxismus-Leninismus

Das X. Gesellschaftswissenschaftliche Kolloquium, das zu Ehren des 70. Jahrestages der Großen Sozialistischen Oktoberrevolution durchgeführt wird, soll genutzt werden, um die in der wissenschaftlichen Arbeit erreichten Ergebnisse profilbestimmender Forschungsgruppen der Sektion vorzustellen und zu diskutieren.

In den folgenden 5 Arbeitskreisen besteht die Möglichkeit zu einem umfassenden Erfahrungsaustausch.

1. Zur regionalen Geschichte der KPD-Bezirksorganisation Magdeburg.
   Anhalt in den Jahren 1917—1945
   — Die Große Sozialistische Oktoberrevolution und ihre Widerspiegelung in der Arbeiterbewegung Magdeburg-Anhalt
   — neue Forschungsergebnisse zur Geschichte der KPD-Bezirksorganisation
   — methodische und methodologische Fragen der Erforschung der regionalen Parteigeschichte.
2. Umfassende Intensivierung — sozialistischer Arbeitsprozeß — soziale Aktivität
   — Entwicklungstendenzen des Arbeitsinhalts und des Arbeitsverhaltens.
   — gesellschaftliches Arbeitsvermögen; Qualifikation und Disponibilität als Faktoren der Produktivitäts- und Persönlichkeitsentwicklung
   — Bewußtheit und soziale Aktivität; sozialpsychologische Probleme der ideologischen Arbeit.
3. Entwicklungsprobleme der sozialistischen Demokratie
   — Sozialistische Intensivierung und politische Führungstätigkeit
   — die Rolle des Arbeitskollektivs bei der Entwicklung der sozialistischen Demokratie im Betrieb.
4. Zur Analyse der Ideologie und Politik nichtproletarischer demokratischer Bewegungen in der BRD und anderen kapitalistischen Ländern Europas und der Kampf für Frieden und sozialen Fortschritt. Objektive und subjektive Potenzen und Grenzen nichtproletarischer demokratischer Kräfte
   — Bedingungen, Formen und Methoden des Protestes im Streben nach Frieden, Abrüstung, Entspannung, friedlicher Koexistenz.
5. Der Einfluß internationaler Monopolisierungsprozesse auf die Bewegung der Widersprüche im gegenwärtigen Kapitalismus
   — Internationale Monopolisierungsprozesse in der EG unter Einfluß internationaler staatsmonopolistischer Regulierungsmaßnahmen
   — zur Rolle transnationaler Konzerne im Technologietransfer
   — zur Rolle des Auslandskapitals im Industrialisierungsprozeß schwachentwickelter Länder sozialistischer Orientierung.

Anfragen

Technische Hochschule
„Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro
Postschließfach 124
Magdeburg
3010

J. Vogel, Magdeburg EA 2325

Neue Maßstäbe auf dem Gebiet der Elektronenstrahltechnik zum Schmelzen und Bedampfen

Von
Dr.-Ing. Helmuth Markov
Abteilungsleiter Elektronenstrahltechnik
Dr.-Ing. Eckard Martin
Direktor für Wissenschaft und Technik

Kombinat VEB Lokomotivbau-Elektrotechnische Werke „Hans Beimler"
Hennigsdorf

Bereits 1879 wurde die Möglichkeit demonstriert, eine Platinanode in einer Katodenröhre mittels Elektronenstrahl zu schmelzen. Wissenschaftler, wie Pirani, der in einfachsten Elektronenstrahlöfen zu Beginn unseres Jahrhunderts reines Tantal und andere Metalle schmolz; M.v.Ardenne, der schon 1938 den Elektronenstrahl zum Bohren kleiner Löcher und zum Verdampfen von Metallen benutzte, waren die Wegbereiter einer neuen Technologie zur Herstellung von Reinstmetallen bzw. Oberflächenbeschichtung. Die weitere Entwicklung dieser neuen Verfahren wurde jedoch durch das Fehlen leistungsstarker Vakuumpumpen und der entsprechenden Elektronenstrahlsysteme (Kanonen) sowie der geringen Nachfrage nach hochreinen Metallen bzw. Legierungen gebremst.

Der Übergang von Laboreinrichtungen zu Industrieanlagen erfolgte in den Jahren von 1958 bis 1963 unabhängig voneinander in mehreren Ländern, nachdem in solchen Zweigen, wie der Flugzeugindustrie, Raumfahrttechnik, Elektro- und Elektronikindustrie, Chemieanlagen- und Maschinenbau der Bedarf an Materialien, die in der Lage sind, hohe statische und dynamische Belastungen, Temperaturbeanspruchungen usw. über große Zeitspannen aufzunehmen, steil anstieg.

Die derzeitige internationale Investitionsfreudigkeit auf dem Gebiet des Elektronenstrahlschmelzens und -bedampfens ergibt sich durch eine erweiterte Applikation bestimmter Werkstoffe, wie zum Beispiel Nb und NbTi-Legierungen für Supraleiter, Superalloys, Tantal, Wolfram, Uran sowie oberflächenbeschichteter Werkstoffe als Kontaktkämme für die Mikroelektronik, Gehäuse für galvanische Stromquellen bis hin zu Halbzeugen korrosionsgeschützter Autokarosserien.

Grundsätzlich kann vermerkt werden, daß der Innovationsprozeß zur Findung weiterer Anwendungsmöglichkeiten noch nicht abgeschlossen ist und sich gegenwärtig eine Anzahl neuer Materialqualitäten bzw. Bearbeitungstechnologien, hergestellt und realisiert mit Elektronenstrahlen, experimentell im Labor bewährt haben. Der spürbare Einsatz in der Praxis steht unmittelbar bevor.

Elektronenstrahlschmelz- und Bedampfungsanlagen sind vakuummetallurgische Sondereinrichtungen. Aus diesem Grunde wird jede Anlage entsprechend der gewünschten Technologie des künftigen Betreibers angepaßt.

So wurden zum Beispiel bei dem auf dem Titelbild dargestellten Elektronenstrahlmehrkammerofen EMO 600 kW einige technische Neuheiten realisiert:

1. Kleinstückiges Material wird zuerst verschweißt und dann umgeschmolzen, d.h., zwei verschiedene technologische Prozesse in einer Anlage
2. Einsatz eines Blockabzugssystems, das ein kontinuierliches Drehen des umgeschmolzenen Blockes im Kristallisator ermöglicht
3. Einsatz pneumatischer Ventile zur Vereinfachung der Vakuumsteuerung
4. Einsatz einer Varioanode zur Veränderung des Strahlstromes mittels Veränderung des Abstandes Anode-Katode.

Die in den letzten Jahren erzielten Erfolge auf den Außenmärkten, insbesondere in Japan, zeigen, daß die im VEB Lokomotivbau-Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" (LEW) produzierte Ofenleistungsreihe von 60 bis 1200 kW Schmelzleistung für Forschung und Industrie als auch die Bandbedampfungsanlagen im Bereich von 35 bis 300 mm Bandbreite den Erfordernissen moderner Technologie gerecht wird.

Selbstverständlich gehören zum Verkaufsfortschritt auch solche wichtigen Punkte, wie kurze Lieferzeiten, perfekter Service, Schulung des Bedienpersonals usw. Bei Lieferung von Anlagen können gleichfalls folgende Leistungen eingebunden werden:

— Vergabe von technologischem Wissen zur Nutzung der gelieferten Anlagen
— Projekterarbeitung zur Erstellung kompletter Anlagen der Elektronenstrahltechnik
— Erarbeitung von Aufgabenstellungen für Baugruppen, die durch den Anwender selbst erstellt werden können
— Chefmontage und Inbetriebnahme.

Härter, hitzebeständiger, korrosionsbeständiger, reiner — diesen Anforderungen an neue Werkstoffe stellt sich die Elektronenstrahltechnik, Flexibilität bei der Realisierung spezieller Technologien, dadurch baut die Elektronenstrahltechnik ihre Anwendung als sondermetallurgisches Verfahren aus.

EA 2362

Prof. Dr.-Ing. e. h. Walter Mönnig – 80 Jahre

Walter Mönnig wurde in Karlsbad geboren, besuchte dort die Schule und studierte später in Prag Elektrotechnik. Er nahm dann Mitte der 30er Jahre nach einer vorübergehenden Beschäftigung in einem Kleinbetrieb eine Tätigkeit als Berechnungsingenieur im Sachsenwerk Dresden auf. Hier galt sein besonderes Interesse der theoretischen Durchdringung der elektrischen Maschinen und ihrer rechnerischen Beherrschung. So lernte er intensiv Gleichstrommaschinen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen in all ihren Varianten des typenreichen Programmes des Betriebes kennen. Die enge Zusammenarbeit mit dem Prüffeld ermöglichte ihm von Anfang an ein tiefes Eindringen auch in die physikalischen Zusammenhänge. Der Zusammenhang von Technologie und Konstruktion wurde ihm schnell bewußt und vertraut. Nicht zuletzt aber auch wurde er mit Kleinmotoren und den Problemen der Präzisionsfertigung vertraut.

Nach dem Zusammenbruch des faschistischen Deutschlands nahm er sofort wieder seine Tätigkeit im Betrieb auf, wurde aber gleichzeitig auch in ein sowjetisches Konstruktionsbüro als Chefkonstrukteur übernommen. Jahrelang hat er sowohl in dieser Einrichtung als auch im Sachsenwerk an verantwortlicher Stelle gearbeitet. Viele sich ergänzenden Probleme konnten gelöst werden, und so hatte *Walter Mönnig* Anteil an der Neuentwicklung von Kran- und Hüttenwerksmotoren, die lange Jahre das Produktionsprofil zahlreicher Betriebe bestimmten. Mit dem Aufbau der Grundstoffindustrie, insbesondere der Stahlindustrie und der chemischen Industrie in der DDR, ergaben sich hohe Anforderungen an den Elektromaschinenbau und an den neugegründeten VEB Elektromaschinenbau Sachsenwerk Dresden-Niedersedlitz. *Walter Mönnig*, nunmehr Chefkonstrukteur dieses Großbetriebes, zeichnete hier verantwortlich für den wissenschaftlich-technischen Vorlauf auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen, der Leistungstransformatoren, der Schaltanlagentechnik und der Hochspannungsschaltgeräte. Mit der ihm eigenen Gründlichkeit, seinem physikalischen Herangehen an die Probleme, ihrer mathematischen Formulierung und schließlich ihrer technisch-konstruktiven Umsetzung gelang es ihm, das Sortiment des Betriebes maßgebend in der Profilierung zu beeinflussen. Es entstanden die Walzenstraßenmotoren für Reversier- und Durchlaufantriebe, es wurden die Kompressormotoren für die chemische Industrie entwickelt, Turbogeneratoren wurden in das Fertigungsprogramm aufgenommen und nicht zuletzt ging es an die komplizierte Aufgabe der Entwicklung von Wasserkraftgeneratoren und von Bahnmotoren. Letztendlich zeigte sich in zunehmendem Maße, daß technologische Prinzipien auch im Bereich von Mittel- und Großmaschinen Bedeutung gewinnen, und es nahm daher nicht wunder, daß *Walter Mönnig* die Frage der Entwicklung einer unifizierten Reihe von elektrischen Maschinen ins Auge faßte.

Heute, viele Jahre nach seinem Ausscheiden aus dem Betrieb, ist diese Maschinenreihe ein Standardsortiment, das in alle Welt verkauft wird.

Gern erinnern sich alle an die Zusammenarbeit mit *Walter Mönnig*, der sich immer wieder an die Spitze von Aufgaben aus Wissenschaft und Technik gestellt hat, und dem es vergönnt war, viele erfolgreiche Entwicklungen zu erdenken und mit den von ihm geleiteten Kollektiven bis zur Serienreife umzusetzen. Kluges Abwägen auf der einen Seite und risikofreudiges Herangehen auf der anderen Seite kennzeichneten seinen Arbeitsstil, der sich auch auf die Mitglieder des Kollektivs auswirkte. *Walter Mönnig* hat über viele Jahrzehnte hinweg das Erzeugnissortiment des Betriebes maßgebend geformt. Oft fragte man sich nach der Quelle der Kraft, mit der er an seine Arbeit herangging. In einem musischen Haushalt aufgewachsen, war die Musik zeit seines Lebens Kraftquell und Entspannung. In seinem Berufsleben hat er zahlreiche Ehrungen erfahren. So wurde er im Kollektiv mit dem Nationalpreis ausgezeichnet, erhielt den Titel „Held der Arbeit". Dem Ruf an Hochschulen oder Universitäten des Landes ist er nicht gefolgt, obwohl er ihn mehrmals erhielt, da ihn die Tätigkeit im Betrieb befriedigte und er dort ein wissenschaftlich reiches Betätigungsfeld fand. Dennoch hat er sich den Aufgaben der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses gestellt und wurde als Honorarprofessor an die Technische Universität Dresden berufen, und noch heute sprechen ehemalige Studenten von den interessanten Vorlesungen, die er zur Thematik „Konstruktion elektrischer Maschinen" gehalten hat. Für seine umfassenden wissenschaftlichen und didaktischen Aktivitäten wurde ihm an der Technischen Universität Dresden der Grad eines Dr.-Ing. e. h. verliehen. Seine Schüler und Mitarbeiter denken mit Freude und Dankbarkeit an die langjährige Zusammenarbeit mit *Walter Mönnig* zurück. Zu vielen hat er auch noch bis zum heutigen Tage enge persönliche Bindungen aufrechterhalten, und er ist noch immer ein interessanter Gesprächspartner, wenn es um Fragen von Wissenschaft und Technik geht, und seine kritischen Fragestellungen zwingen auch noch heute den Gesprächspartner zum intensiven Nachdenken und zu qualifizierten Antworten. Dank sei *Walter Mönnig* für langjährige Zusammenarbeit gesagt, und wir wünschen ihm noch viele Jahre Gesundheit.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2309

Ein Vierteljahrhundert Markterfahrung

Als sich im Jahre 1961 die damaligen Vereinigungen Volkseigener Betriebe „Elektromaschinenbau", Dresden und „Elektroprojektierung und Anlagenbau", Berlin entschlossen, den Warenzeichenverband VEM zu gründen, war es ihr gemeinsames Ziel, ein bereits seit 1948 existierendes und von ihnen genutztes Zeichen forthin als ihr gemeinsames Warenzeichen zu verwenden und auf allen internationalen Märkten unter diesem Zeichen aufzutreten. Mit der Gründung des Verbandes ging eine zielstrebige Leistungsentwicklung der dem Verband angehörenden Mitgliedsbetriebe einher, die sich sowohl im Produktionsumfang als auch im wissenschaftlich-technischen Niveau der Erzeugnisse widerspiegelt. Im Zuge des fortschreitenden Ausbaus der Wirtschaft entstanden aus den beiden Vereinigungen leistungsstarke Kombinate, denen neue Betriebe zugeordnet wurden und deren Produktionsprofil sich ständig erweiterte. Parallel dazu gestaltete sich der Warenzeichenverband. Waren es im Jahre 1961 32 Mitgliedsbetriebe mit rund 41000 Beschäftigten, so zählt der Verband 1986 66 Mitgliedsbetriebe mit über 96000 Beschäftigten, die ihre Erzeugnisse mit „VEM" kennzeichnen oder als Vertragswerkstätten zur Gebrauchswerterhaltung der Erzeugnisse beitragen. Den Kern des Verbandes bilden vier Kombinate:

Der VEB KOMBINAT ELEKTROMASCHINENBAU, DRESDEN mit 12 Betrieben und 30000 Beschäftigten. Seine Haupterzeugnisse sind Elektromotoren und -generatoren mit einem Leistungsbereich von 0,5 Watt bis 16 MW.

Der VEB KOMBINAT AUTOMATISIERUNGSANLAGENBAU, BERLIN mit 17 Betrieben und 56000 Beschäftigten. Seine Haupterzeugnisse sind Automatisierungs- und Steuerungsanlagen, numerische Steuerungen, Signal- und Sicherungsanlagen, industrielle Leistungselektronik, Energieerzeugungs- und Übertragungsanlagen sowie Hochspannungstransformatoren.

Das KOMBINAT VEB LOKOMOTIVBAU-ELEKTROTECHNISCHE WERKE „HANS BEIMLER", HENNIGSDORF mit 8 Betrieben und anteilig 8000 Beschäftigten (VEM-Produktion).

Das Hauptsortiment dieser Betriebe umfaßt Galvanisierungs- und Induktionsanlagen, Infrarotanlagen, Industrieöfen und Isolierstoffe.

Das Kombinat Elektroanlagenbau Kyritz mit 6 Betrieben und 900 Beschäftigten (bezirksgeleitet).

Ein wesentliches Merkmal der den Verband repräsentierenden Kombinate ist, daß sie nicht nur unter dem gleichen Warenzeichen auftreten, sondern auch durch enge Kooperationsbeziehungen miteinander verbunden sind.

Fortsetzung auf Seite 475

Im Rhythmus von drei Jahren findet in Magdeburg eine Veranstaltung statt, die sich mit Elektrotechnologie befaßt. In der Sektion D werden Strahlverfahren behandelt. Laserstrahlen, Elektronenstrahlen, Plasmastrahlen und Ionenstrahlen. Ausrüstungen und technologische Fragen stehen zur Diskussion. Zum Teilnehmerkreis gehören sowohl Entwickler von Anlagen als auch potentielle Nutzer. Das Zusammenfassen zunächst sehr verschiedener Verfahren in einer Sektion hat sich als sehr vorteilhaft herausgestellt. Schließlich gibt es außer spezifischen Einsatzfällen für die einzelnen Verfahren Überlappungen und gerade dann, wenn sowohl das eine oder andere Strahlverfahren in Frage kommt, entspann sich häufig eine lebhafte Diskussion. Schließlich ist jeder von „seiner" Lösung überzeugt und hat auch ein Recht darauf, diese zu verteidigen. Durch den Disput erhält der mögliche Kunde viele Hintergrundinformationen, zu denen er sonst häufig gar keinen Zugang hat. Vorträge und Diskussionen waren sehr praxisorientiert.

Die Tagung soll fortgesetzt werden.

Im folgenden werden einige dieser Vorträge durch Publikation einem größeren Kreis zugänglich gemacht. EA 2361

Prof. Dr. rer. nat. S. Schiller

Oberflächenveredlung mittels Ionenstrahlen

K. Hennig; Edgar Richter; Emil Richter; A. Schmidt; Rossendorf

Eine mögliche Alternative zur Oberflächenveredlung durch Elektronen- oder Laserstrahlen stellt die Behandlung mit Ionenstrahlen Ionenimplantation dar. Die Ionenimplantation wird heute weltweit angewendet zur gezielten Dotierung von Halbleitermaterialien für die Mikroelektronik. Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß durch den definierten Einschuß bestimmter Ionen in die Festkörperoberfläche nicht nur deren elektrische, sondern eine Vielzahl weiterer physikalischer und chemischer Eigenschaften verändert werden können. Von besonderem Interesse sind derzeit die mechanischen Eigenschaften, wie Reibung, Verschleiß und Ermüdung, sowie die Korrosionsbeständigkeit. Dazu liegen auch in der Literatur die meisten Ergebnisse vor. Neben Grundlagenuntersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Festkörper und Ionenstrahl wurden frühzeitig anwendungsorientierte Arbeiten durchgeführt, so daß heute bereits Prototypen von Implantern für den technischen Einsatz der Ionenimplantation zur Verschleißminderung existieren [1] [2].

1. Prinzip des Verfahrens

In einer Ionenquelle (z.B. Freeman-Typ) werden einfach positiv geladene Ionen erzeugt, die in einem elektrischen Gleichspannungsfeld auf Energien bis zu einigen Hundert keV beschleunigt und anschließend in die Festkörperoberfläche eingeschlossen werden. In der Regel arbeitet man mit Beschleunigungsspannungen von 100 bis 150 kV. Die Eindringtiefe der Ionen ist abhängig von ihrer Energie und Masse sowie von den Massen der Atome im zu implantierenden Festkörper. Je höher die Energie und je geringer die Massen sind, desto tiefer dringen die implantierten Ionen ein. Unter den angegebenen Bedingungen bleibt die Eindringtiefe stets $< 1\,\mu m$. Diese Schichtdicke ist für den konventionellen Verschleißschutz ansich zu gering. Dennoch konnte eine deutliche Verschleißminderung an implantierten Stählen nachgewiesen werden. Die Prozesse, die dabei in den stark beanspruchten Oberflächenregionen ablaufen, werden heute noch nicht völlig verstanden. Es existieren dazu Modellvorstellungen, die jedoch die beobachteten Phänomene nur unvollständig beschreiben.

Während für die Dotierung von Halbleitermaterialien Implantationsdosen von 10^{12} bis 10^{15} Ionen/cm² genügen, benötigt man zur Modifizierung der mechanischen und chemischen Eigenschaften Implantationsdosen $> 10^{17}$ Ionen/cm². Um wirtschaftlich implantieren zu können, braucht man deshalb leistungsstarke Ionenquellen, die Ionenströme von mehreren mA und Bearbeitungsflächen von einigen 1000 cm² ermöglichen. Derzeit können diese Parameter nur für Gasionenquellen (Stickstoff, Edelgase) erreicht werden.

Durch die Ionenimplantation ist man in der Lage, praktisch jedes Element in eine vorgegebene Matrix zwangsweise einzubauen. Die Elementarprozesse beim Einschuß des Ions sind in etwa 10^{-12} bis 10^{-10} s abgeschlossen, so daß in der implantierten Oberflächenschicht Zustände weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht fixiert sind. Es kommt zur Ausbildung metastabiler amorpher oder kristalliner Phasen, die der implantierten Oberfläche ihre speziellen Eigenschaften verleihen. In jüngster Zeit hat sich ein neuer Wissenszweig herausgebildet, der diese Prozesse der Legierungs- und Phasenbildung, der Phasentransformation, der Amorphisierung und Rekristallisation untersucht und aufgeklärt, die Implantationsmetallurgie. Aus der Kenntnis dieser metallurgischen Faktoren kann man unter Berücksichtigung bestimmter maschinentechnischer Parameter Bedingungen für eine optimierte praktische Nutzung der Ionenimplantation ableiten.

Zum Vergleich der Ionenimplantation mit anderen modernen Verfahren der Oberflächenveredlung (Elektronen-, Laserstrahlbearbeitung, PVD-, CVD-Prozesse) ergeben sich folgende entscheidende Vorteile:

- Reproduzierbarer (Ionenstrommessung), gut kontrollier- und steuerbarer Einbau der jeweiligen Komponente in die Werkstoffoberfläche unter sehr sauberen Bedingungen (Hochvakuum).
- Die gebildeten neuen chemischen Verbindungen und Ausscheidungen in der ionenimplantierten Oberfläche liegen weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Thermodynamische Löslichkeitsgrenzen (z.B. für N_2) lassen sich umgehen.
- Arbeiten bei Raumtemperatur ist möglich, d.h. das Grundgefüge wird während des Implantationsprozesses praktisch nicht beeinflußt.
- Es erfolgt kein Schichtaufbau und keinerlei Materialabtrag, die Maßhaltigkeit wird nicht berührt, Nacharbeitungen sind nicht erforderlich.
- Man kennt keine Probleme der Haftung der Schutzschicht auf dem Basismaterial, da kein Interface existiert, sondern ein kontinuierlicher Übergang entsprechend dem Eindringprofil der implantierten Ionen.

Nachteilig sind die geringe Dicke der veredelten Schicht und die z.Z. noch sehr hohen Anlagenkosten.

2. Implanterdesign

Anlagen für die Ionenimplantation in Metalle wurden aus den Implantern der Halbleiterindustrie entwickelt. Neben einigen in verschiedenen Ländern installierten Gerätesystemen für Forschungsvorhaben existieren in England, den USA und Japan bereits Prototypen für den Einsatz der Ionenimplantation zur Verschleiß- und Korrosionsminderung bei Werkzeugen und Maschinenelementen aus Stahl und Hartmetallen. Diese Implanter bestehen in der Regel aus vier Funktionsgruppen: der Ionenquelle zur Ionenerzeugung, der Hochspannungseinheit zur Beschleunigung der Ionen, der Einheit zur Strahlsteuerung und -formung (mit und ohne Massenseparation) und einem Endmodul mit dem gesamten Targethandling-System. Das Design wird wesentlich durch die folgenden maschinentechnischen Faktoren bestimmt:

- Ionenart, Ionenenergie, Ionendosis, Ionenstromdichte
- Druck und Restgaszusammensetzung in der Targetkammer
- Prozeßtemperatur am Werkstück während der Implantation
- Geometrie des Werkstücks
- Schatteneffekte des Ionenstrahls.

Prof. Dr. sc. nat. *Klaus Hennig* ist 1. Stellvertreter des Institutsdirektors, Dr. sc. nat. *Edgar Richter* ist Abteilungsleiter, Dr.-Ing. *Emil Richter* ist Hauptabteilungsleiter, Dr. rer. nat. *Achim Schmidt* ist stellvertretender Bereichsleiter am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf der AdW der DDR.

Während die ersten drei Baugruppen universell einsetzbar sind, werden für die einzelnen Werkzeugtypen — bedingt durch deren Geometrie — spezielle Endmodule benötigt. Ein wichtiges Problem ist dabei die Wegführung der Wärme, da quasi die gesamte Energie des Ionenstrahls in der Werkstückoberfläche in Wärme umgewandelt wird. Die Kühlung rotierender Teile im Vakuum ist bekanntlich nicht trivial. Rechnungen haben ergeben, daß vom Ionenstrahl getroffene Spitzen und Kanten nur eine geringfügig höhere Temperatur haben als die Matrix. Solange die Abführung der Wärme über Wärmeleitungsprozesse größer ist als die Wärmeproduktion des Ionenstrahls, treten keine Temperaturspots auf. Die maximale Ionenstromdichte wird demzufolge durch die Wärmeleitfähigkeit des Materials begrenzt. Allgemein ist die Beherrschung des Wärmeregimes eines der grundsätzlichen Probleme der Ionenstrahltechnologie.

3. Anwendungsbeispiele

Für eine industrielle Nutzung der Ionenimplantation bei Metallen stehen vorerst nur Stickstoffionenquellen ausreichender Fluenz zur Verfügung. Die Stickstoffionenimplantation zur Verschleißminderung wurde bereits an einer Vielzahl von Produktionswerkzeugen mit Erfolg getestet. Die Palette reicht von Bohrern für die Leiterplatten über Kaltumformwerkzeuge, Gleitlager, Schneidwerkzeuge aus Stahl oder Hartmetallen bis hin zu Hüftgelenkimplantaten für medizinische Zwecke auf der Basis einer Ti-Al-V-Legierung. Die erreichten Standzeitverbesserungen liegen dabei zwischen 200 und 1000 % je nach Werkzeugart und Einsatzbedingungen (Tafel 1).

Tafel 1. Verbesserungen der Standzeit nach Stickstoffimplantation nach [3]

Anwendung	Material	Standzeitfaktor, Verbesserungen
Papiermesser	Stahl	2 ×
Stanzwerkzeug für Acetatfolie	Stahl, hartverchromt	besseres Produkt
Bohrer für Phenolharze	HSS	5 ×
Schneideinsätze	Stahl	3 ×
Einspritzdüsen und -pumpe	Stahl	100 ×
Ventilstößel	Stahl	höhere Lebensdauer
Plastemesser	Diamant	2—4 ×
Hüftgelenkprothesen	Ti-6Al-4v	100 ×

Die Ionenstrahltechnologie steht noch am Anfang ihrer Entwicklung. Die möglichen Einsatzgebiete sind bei weitem noch nicht völlig erschlossen, die Abgrenzung zu Konkurrenztechniken noch sehr lückenhaft. Vor allem auf den Gebieten Ermüdungsfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit sind weitere Fortschritte zu erwarten. Anlagentechnik und Kostenaufwand schließen allerdings den Einsatz für Billigerzeugnisse mit Sicherheit aus.

4. Dünnschichtaktivierung (DSA) für Verschleißuntersuchungen

Um neue Erkenntnisse, die auf eine Verschleißminderung Einfluß haben, schnell zur ökonomischen Wirkung zu bringen, ist es u.a. notwendig, effektive Testmethoden zur Verschleißbestimmung anzuwenden, die insbesondere in kurzer Zeit Aussagen mit genügender Genauigkeit liefern. Die Kurzzeitverschleißmessung mit Hilfe der Dünnschichtaktivierung ist eine der hierzu geeigneten Methoden.
Bei der DSA werden kleine Flächen eines Werkstückes im mm^2- bis cm^2-Bereich mit hochenergetischen Ionen beschossen. Dabei treten im Material Kernreaktionen auf, in deren Folge ein Teil der Atome des Werkstoffs zu radioaktiven Isotopen umgewandelt wird. Diese Isotope senden eine charakteristische Strahlung aus, deren Intensität mit einer bestimmten Halbwertszeit abklingt. Die Aktivierungstiefe der beschleunigten Ionen im Material und damit der Meßbereich bei der Verschleißuntersuchung liegt für die Beschleuniger des ZfK im Bereich bis zu 300 µm. Die für die Untersuchung zu aktivierende Fläche, die Eindringtiefe, die Intensität der zur Messung zu nutzenden Strahlung, sowie in bestimmten Grenzen die optimale Meßperiode (z.B. 50 bis 100 Tage) wird durch die Wahl der Bestrahlungsparameter, wie Ionenart, Ionenenergie, Einschußwinkel, Dauer der Bestrahlung und zu erzeugende Isotope, bestimmt und den Untersuchungsbedingungen angepaßt.
Bei der Verschleißbestimmung wird die Materialabtragung an Hand der dabei abnehmenden Strahlung gemessen, wobei gleichzeitig das natürliche Abklingen der radioaktiven Strahlung berücksichtigt wird. Andererseits kann der Weg des Abriebs verfolgt bzw. die Zunahme der Aktivität (d.h. des Abriebs), z.B. im Schmiermittel, gemessen werden.
Da die radioaktive Strahlung Wandungen von Bauteilen im mm- bis cm-Bereich durchdringt, können die Messungen auch am geschlossenen Apparatesystem während des Betriebes durchgeführt werden. Das heißt, das System braucht für die Aufnahme eines Meßwertes nicht zerlegt und wieder montiert zu werden. Letzteres ist fast immer mit Ungenauigkeiten verbunden, die die Qualität der Meßreihe beeinträchtigen. Dieser wohl markanteste Vorteil der dargelegten Methode wird durch die Zeiteinsparung, die durch den Wegfall der Montagearbeiten auftritt, noch vergrößert.
Weitere Vorteile der Methode sind:

- Bei langsamem bzw. geringem Verschleiß können bereits nach kurzer Zeit Aussagen gewonnen werden. Die Nachweisgrenze für den Materialabtrag liegt je nach Meßaufwand bei 10^{-10} g
- Untersuchung des Verschleißverhaltens einzelner Komponenten einer Legierung durch die Erzeugung unterschiedlicher charakteristischer Strahlung
- Gleichzeitige Verschleißmessung an verschiedenen am Verschleiß beteiligten Bauelementen durch die Erzeugung unterschiedlicher Isotope
- Geringe Radioaktivität (in der Regel unter der gesetzlichen Freigrenze), da nur dünne Schichten und kleine Flächen im interessierenden Bereich aktiviert werden.

Bisher in der DDR durchgeführte Untersuchungen erstrecken sich u.a. auf Kolbenringe, Zylindergleitbuchsen, Gelenkwellen, Einspritzpumpen, Kompressoren, Rad/Schiene, Weichenbauteile, Zahnräder, Ziehsteine, Rohrkrümmer u.a.m. Dabei konnten z.B. der optimale Zeitpunkt für Generalreparaturen in einem Hochdruckvorwärmer ermittelt, Entscheidungen für die Einführung verschleißmindernder Maßnahmen innerhalb von 5 Monaten statt bisher in 4 Jahren getroffen und Einlaufprogramme für Dieselmotoren optimiert und um 5 bis 15 Stunden verkürzt werden.
Obwohl die DSA nur eine der Methoden zur Verschleißuntersuchung und nur in etwa 10 % der Fälle sinnvoll anwendbar ist, kann sie in diesen Fällen von anderen Methoden kaum übertroffen werden. Die Anwendung der Methode wird in der DDR seit etwa 15 Jahren praktiziert, was in ähnlichem Umfang nur in der BRD und in England der Fall ist. Unseres Erachtens sind jedoch bisher weder die kapazitiven Möglichkeiten noch die mögliche Breite der Anwendbarkeit ausgeschöpft. Hier sei vor allem auf den Verschleiß im allgemeinsten Sinn, einschließlich Korrosion u.ä. auf den Stofftransport, wie z.B. Übertragung des Materials vom Werkstück auf das Werkzeug oder die Verfolgung von Bewegungsabläufen in Anlagenteilen durch die Aktivierung bestimmter Stellen an einzelnen Bauteilen, verwiesen.
Die Ursachen für die noch ungenügende Ausschöpfung der sich bietenden Möglichkeiten dürfte — auch internationalen Feststellungen folgend — darin zu sehen sein, daß

- zwar nicht in jedem Fall zwingend, aber doch zweckmäßig beim Anwender die erforderliche kernphysikalische Meßtechnik zu schaffen ist
- die Methode eine enge Zusammenarbeit zwischen Fachleuten der Werkstofforschung, des Maschinen- und Anlagenbaus und der Kernforschung fordert
- geeignete Ionenbeschleuniger nur in geringer Zahl zur Verfügung stehen und gleichzeitig die oft damit verbundene räumliche Trennung der Einrichtungen für Aktivierung einerseits und Werkstoffuntersuchung andererseits zwar kein prinzipielles Hindernis ist, aber doch die Kontaktfindung der Zusammenarbeit der Partner ungünstig beeinflussen kann
- der psychologische Effekt der Abneigung zum Umgang mit radioaktiven Stoffen bzw. die Überschätzung diesbezüglich notwendiger Sicherheitsmaßnahmen hemmend wirkt und daß
- schließlich die Methode selbst und die durch sie gebotenen Möglichkeiten noch zu wenig bekannt sind.

Literatur

[1] *Denholm, A. S.; Wittkower, A. B.:* Ion beam system for implanting industrial products of various shapes. Nucl. Instr. Meth. B 6 (1985), S. 88—93
[2] *Armini, A. J.; Bunker, S. N.:* A high throughpul metal ion implanter end station. Nucl. Instr. Meth. B 6 (1985), S. 214—218
[3] *Hirvonen, I. K.:* Industrial applications of ion implantation. MRS Proc. 27 (1984), S. 621—629

EA 5643

Leistungsmodulierbare elektronische Stromquelle für CO_2-Laser

P. Zacharias, KDT; H. Schiedung; Magdeburg; R. Reißmüller, Berlin

Aufbauend auf der intensiven Forschungs- und Entwicklungstätigkeit der zurückliegenden 10 bis 15 Jahre finden derzeit CO_2-Laser mit Ausgangsleistungen im Bereich von 50 W bis 10 kW zunehmend industrielle Anwendung für die Materialbearbeitung. Neben einer Weiterentwicklung des optischen Systems und der Systeme zur Gasbereitstellung und -kühlung sowie der Servoeinrichtungen ergeben sich über Neuentwicklungen im Bereich der Stromversorgung vielfältige Möglichkeiten zur Verbesserung qualitativer und quantitativer Parameter von technologischen CO_2-Lasern [1].
Zielstellung einer Reihe jüngerer Arbeiten ist die Erhöhung des Wirkungsgrades sowie die Modulierbarkeit der Ausgangsleistung und eine Verbesserung des Zündverhaltens des Lasers zu Beginn der Bearbeitung [2] [3]. Dies führt zur Anwendung einer Wechselstromanregung der Gasentladung im Mittel- und Hochfrequenzbereich, die teilweise die Laserkonstruktion vereinfacht [2] [3] [4].
In Zusammenarbeit mit dem ZFW Dresden wurde an der TH Magdeburg eine moderne Stromquelle zum Erreichen der o.g. Zielstellung entwickelt [4], über deren Eigenschaften und Parameter nachfolgend berichtet wird.

1. Funktionsweise

Die Laserstromquelle wurde in Form eines reihenkompensierten Schwingkreisumrichters realisiert (Bild 1). Zunächst wird mit einer 6-Puls-Brücke aus der dreiphasigen Netzspannung eine Zwischenkreisgleichspannung U_d erzeugt und mit dem Kondensator *C1* gepuffert. Durch abwechselndes Zünden der Thyristoren *VT1* und *VT2* wird der aus dem Transformator *Tr* und den Kondensatoren *C2* und *C3* gebildete Schwingkreis angeregt. Die Eigenfrequenz des Schwingkreises beträgt dabei — je nach Art und Größe der Last — 2 bis 5 kHz. Für das Verständnis der Schaltung in Bild 1 wesentliche Signalverläufe sind im Bild 2 enthalten. Beim Zünden von Thyristor *VT1* bricht die Spannung über diesem zusammen, und *VT1* übernimmt den Strom der Diode *VD2*. Die Drossel *Dr1* dient dabei der Begrenzung der Anstiegsgeschwindigkeit des Thyristorstromes. Nach dem Stromnulldurchgang in *VT1* geht der Schwingkreisstrom von *VT1* auf *VD1* über. Hierbei wird an *VT1* eine negative Spannung erzeugt, die zu einer Verkürzung der Freiwerdezeit des Thyristors *VT1* führt. Dies ermöglicht im Vergleich zu anderen Schaltungen bei der erarbeiteten Stromquelle eine Verringerung der minimal zulässigen Thyristorschonzeit t_s und damit eine maximale umsetzbare Wirkleistung. Der im Schwingkreis befindliche Transformator *Tr* dient der Potentialtrennung und der Anpassung der Ausgangsspannung der Stromquelle an die Erfordernisse der Niederdruckgasentladung des CO_2-Lasers. Zur Gewährleistung der sicheren Zündung von 2 separat angeschlossenen Entladestrecken ist der Transformator nach einer speziellen Konstruktionsvorschrift [5] gefertigt. Auf Grund der hohen Eigenfrequenz des Schwingkreises läßt sich dieser Hochspannungstransformator mit geringen Abmessungen und geringer Masse ausführen. Bei einer Ausgangsleistung der Stromquelle im Dauerbetrieb von 3,3 kW beträgt die Masse des Transformators nur 4,5 kg. Prinzipbedingt ergibt sich bei Schwingkreisumrichtern ein annähernd sinusförmiger Strom durch den Transformator und die Gasentladungsstrecken. Damit sind wesentlich geringere Funktionsstörungen als bei dem in [6] vorgeschlagenen Wechselrichterprinzip verbunden.
Ausgangsspannung und Ausgangsstrom der vorgestellten Stromquelle sind durch Veränderung der Thyristorschonzeit t_s in weiten Grenzen veränderbar. Der Stromnulldurchgang des Thyristors wird durch Auswertung des Transformatorstromes $(i_1 + i_2)$ mit dem Stromwandler *SW1* erfaßt und die Zeit t_s in Abhängigkeit vom Stromsollwert und dem mit Stromwandler *SW2* ermittelten Stromistwert eingestellt. Auf diese Weise werden innerhalb des natürlichen Ausgangskennlinienfeldes stark fallende Charakteristiken erzeugt. Das zur Beurteilung des Steuerbereiches und des Steuerverhaltens der Stromquelle wesentliche Feld der natürlichen Ausgangscharakteristiken ist im Bild 3 enthalten. Die Belastungskennlinien der Stromquelle wurden bei Widerstandslast ermittelt, um das Kennlinienfeld möglichst vollständig darstellen zu können. Die reale Belastung durch eine Gasentladung unterscheidet sich etwas davon. Sie ist im vorliegenden Frequenzbereich mit der Parallelschaltung eines Kondensators mit einem nichtlinearen Verlustwiderstand vergleichbar.
Die Ausgangskennlinien sind stark fallend, das unterstützt ein Zünden der Gasentladung. Bei fehlender Last stellen sich auf Grund der geringen Schwingkreisdämpfung sehr hohe Ausgangsspannungen ein, die schließlich zur Zerstörung des Transformators, der Kondensatoren oder der Halbleiterventile führen würden. Deshalb wird die maximale Ausgangsspannung durch Begrenzung des Schwingkreisstromes auf 25 kV festgelegt und die Ausgänge zusätzlich durch eine Kugelfunkenstrecke gegen Überspannungen gesichert.
Weitere Begrenzungen des Kennlinienfeldes ergeben sich durch die zulässige minimale Thyristorschonzeit sowie durch die Mindestbrennspannung der Gasentladung. Innerhalb dieser Grenzen lassen

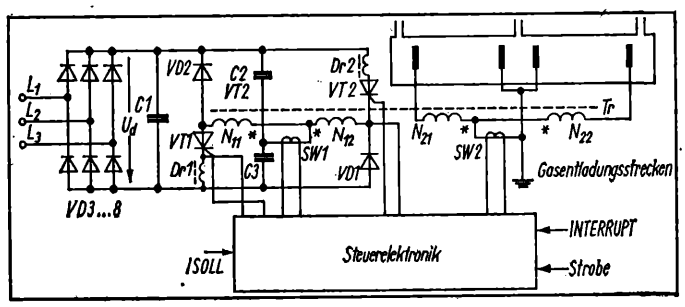


Bild 1. Prinzipschaltung der vorgestellten Stromquelle für technologische CO_2 Laser (Elemente zur Schutzbeschaltung der Thyristoren nicht eingezeichnet)

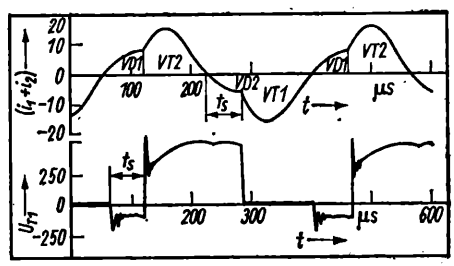
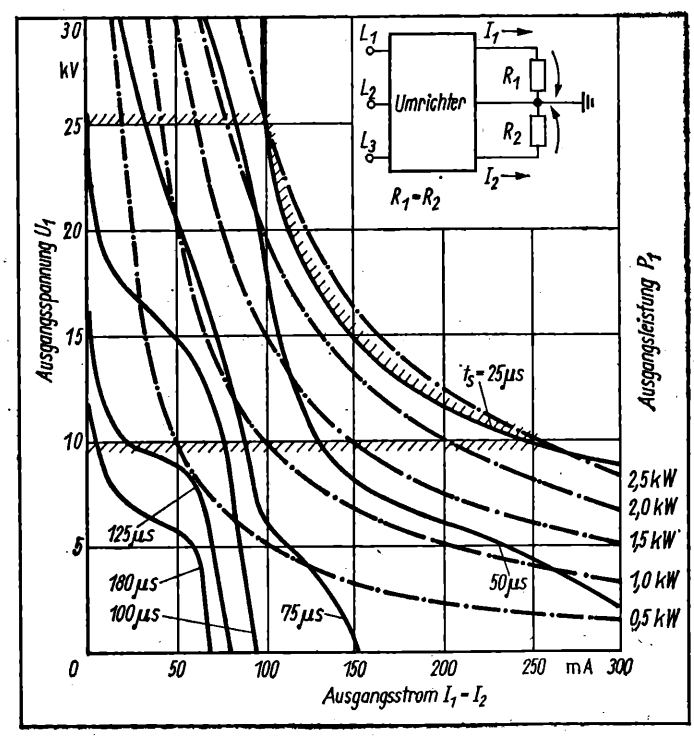


Bild 2. Verläufe von Transformatorstrom $(i_1 + i_2)$ und Thyristorspannung U_{T1} an *VT1*
i_1, i_2 Ströme durch N_{11}, N_{12}; t_s-Schonzeit

Bild 3. Natürliche Belastungskennlinien der Stromquelle bei symmetrischer Last



Dr. sc. techn. *Peter Zacharias* ist wissenschaftlicher Oberassistent, Dr.-Ing. *Harald Schiedung* ist technischer Mitarbeiter an der Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg. Dipl.-Ing. *René Reißmüller* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der AdW Berlin.

sich Arbeitspunkte einstellen. Für eine Ausgangsspannung von 10 kV ist die Steuerkennlinie der Stromquelle aus Bild 4 ersichtlich. Die maximale Ausgangsleistung von $P = 2 \times 2{,}5$ kW bei $t_s = 25$ µs wird auf Grund der thermischen Belastung von Transformator und Thyristoren nur im Impulsbetrieb erreicht. Im Dauerbetrieb wird eine Leistung von maximal 3,3 kW bei 10 kV abgegeben. Wird ein Wirkungsgrad von 4 bis 8 % für den Laser zugrunde gelegt, ist die Stromversorgungseinheit für CO_2-Laser mit optischen Ausgangsleistungen von 130 bis 260 W geeignet.

Die Stromquelle ist sehr kompakt aufgebaut. Die Ventile des Wechselrichters, ihre Schutzbeschaltungen sowie die gesamte Steuerungselektronik des Wechselrichters sind auf einer Leiterplatte 170 × 215 mm² angeordnet. Die Elemente des Schwingkreises, die Stromwandler, der Eingangsgleichrichter und eine Reihe notwendiger Schaltelemente mit Schutz- und Steuerungsfunktionen sind jeweils funktionsgerecht zusammengefaßt. Die Stromquelle wird über eine Interface-Baugruppe an eine numerische Steuerung und eine Meßeinrichtung für die Laserleistung angeschlossen. Es werden für die Laserstromquelle ausschließlich Bauteile der heimischen Produktion bzw. aus Ländern des RGW verwendet. Das Masse-Leistungsverhältnis liegt bei 8 kg/kW. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt 75 bis 85 %.

2. Steuerungsmöglichkeiten

Bei einer Reihe von Anwendungen des Laserstrahls für die Materialbearbeitung wird eine schnelle Veränderbarkeit der Laserausgangsleistung gefordert. Beim Schneiden komplizierter Konturen mit spitzen Ecken oder spröder keramischer Werkstoffe wird durch Übergang zu impulsförmiger Laserstrahlung der Energieeintrag gesteuert. Dadurch werden die Wärmeeinflußzone verringert, Abbrand und Schlackebildung des Materials verhindert und Wärmespannungen im Grundmaterial reduziert. Ähnliche Forderungen gibt es beim Schweißen und Oberflächenbehandeln mittels Laserstrahlung.

Bedingt durch die hohe Eigenfrequenz des Schwingkreiswechselrichters läßt sich die abgegebene Ausgangsleistung mit hoher Geschwindigkeit ändern. Dafür sind die Steuereingänge ISOLL, INTERRUPT und STROBE vorgesehen. Über den Eingang INTERRUPT ist die Stromquelle innerhalb einer Millisekunde softwaremäßig zu- oder abschaltbar. Der Eingang STROBE ermöglicht den Pulsbetrieb der Stromquelle, wobei der Sollwert der Stromimpulsamplitude über ISOLL analog vorgegeben wird. Im Dauerbetrieb gilt STROBE=L und INTERRUPT=H (L= 0 V, H= 12 V). Der Ausgangsstrom der Stromquelle wird mit ISOLL vorgegeben, wobei Modulationen bis 1 kHz möglich sind. Im Bild 5 ist der Ausgangsstrom bei einer sinusförmigen Modulation mit 400 Hz dargestellt.

Bei Wechselstromanregung geht ab Frequenzen von einigen hundert Hertz der Laser vom periodischen Impulsbetrieb in einen Quasi-cw-Betrieb über. Die optische Ausgangsleistung des Lasers pulsiert mit der doppelten Frequenz des Stromes durch die Gasentladung. Diese Pulsation der Ausgangsleistung nimmt mit steigender Frequenz stetig ab und beträgt bei $f = 10$ kHz nur noch etwa 5 bis 10 % des Mittelwertes der Leistung [2]. Bei der vorliegenden Stromquelle ist nach [2] mit einer Pulsation von 12 bis 25 % bei einer Pulsationsfrequenz von 6 bis 8 kHz zu rechnen. Die Zeitkonstanten für die Temperaturübergänge im bearbeiteten Material sind von der Materialart und dem Radius r des auftreffenden Laserstrahls abhängig. Sie liegen für Baustahl und $r = 0{,}25$ bis 1,5 mm im Bereich von 0,8 bis 25 ms. Die vorgestellte Stromquelle wird folglich den dynamischen Anforderungen des Bearbeitungsprozesses weitgehend gerecht.

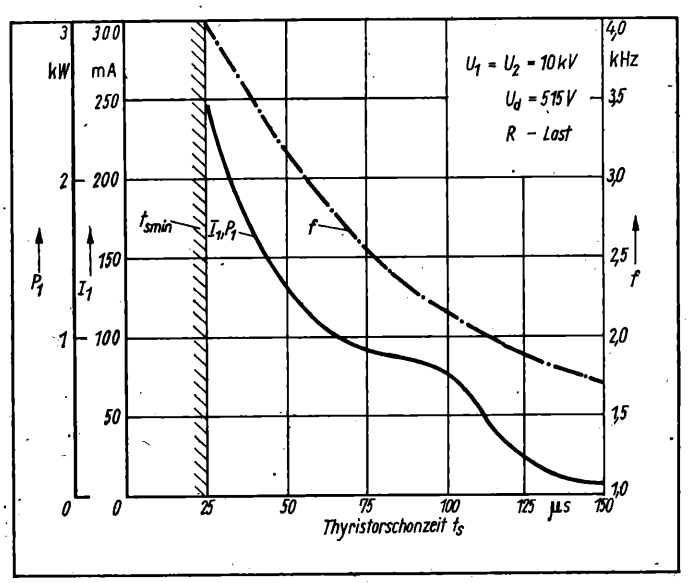
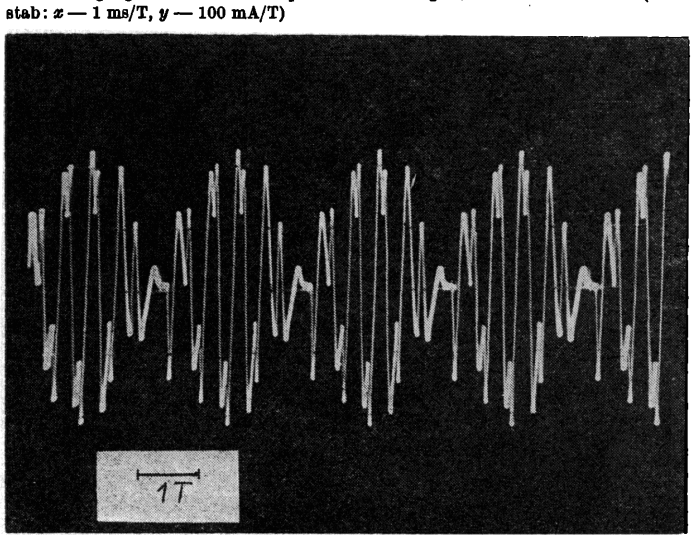


Bild 4. Steuerkennlinie der Stromquelle bei symmetrischer Last L_1, P_1 Strom bzw. Leistung im Lastwiderstand R_1; f Wechselrichterfrequenz

Bild 5. Ausgangsstrom der Stromquelle sinusförmig mit 400 Hz moduliert (Maßstab: x — 1 ms/T, y — 100 mA/T)



3. Zusammenfassung

Es wurde das Konzept und Realisierungsergebnisse für eine moderne Stromversorgung eines CO_2-Lasers für technologische Zwecke vorgestellt. Das Aggregat ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet

- hoher Wirkungsgrad durch direkten Anschluß der Sekundärwicklung des Transformators an die Entladestrecke
- kompakter Aufbau und geringe Masse, insbesondere Senkung des Aufwandes für den Hochspannungstransformator
- schnelle elektrische Steuerbarkeit bzw. Modulierbarkeit der Laserausgangsleistung im Frequenzbereich bis 1 kHz
- gleichzeitige Versorgung von 2 Entladestrecken und
- Möglichkeit der Anregung des Lasers im Puls- und Quasi-cw-Betrieb.

Literatur

[1] *Zacharias, P.:* Elektrophysikalische Materialabtragsverfahren — ihre technische Entwicklung und empirische Modellierung. Dissertation B, TH Magdeburg 1985

[2] CO_2-Leistungslaser und ihre Anwendung in der Technologie. Moskau: Verlag „Nauka" 1984

[3] Materialbearbeitung mit CO_2-Hochleistungslasern. VDI-Berichte 535. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984

[4] *Reißmüller, R.:* Laserversuchsanlage. Diplomarbeit, TH Magdeburg 1985

[5] WP HO1S/276785 7

[6] Patentschrift EP 0067454

EA 5644

Gestaltung der Stromversorgungseinrichtung für Plasmaspritzanlagen

H.-J. Scheibe; H.-D. Musikowski; Magdeburg

Verwendete Formelzeichen

f	Frequenz
h	Spezifische Enthalpie
I_b	Bogenstrom im Nennarbeitspunkt
$i_{b,\,min}$	Minimalstrom (nichtstationär)
$I_{b,N}$	Bogennennstrom
L_d	Gleichstromglättungsinduktivität
p	Pulszahl
p_o	Gasdruck
P_b	Bogenleistung
P_N	Nennleistung der Stromversorgung
T_o	Gastemperatur
$U_{b,N}$	Bogennennspannung
U_{dio}	Ideelle Leerlaufgleichspannung
$U_{d,max}$	Maximale Stromrichterausgangsspannung bei Belastung
$w_{i,zul}$	Zulässige Stromwelligkeit
w_u	Maximale Spannungswelligkeit
W_z	Zündenergie
η	Plasmatronwirkungsgrad

In der DDR hat sich die Plasmaspritztechnologie als ein spezielles Verfahren zur Schaffung reibverschleißfester Hartstoffschichten einen festen Anwenderkreis erobert. Neben importierten Anlagen werden vorwiegend Anlagen eingesetzt, die im eigenen Rationalisierungsmittelbau von meist maschinenbautechnisch orientierten Betrieben entstanden sind.

Die Verfahrenstechnologie basiert auf Grundlagenuntersuchungen, die an der TH Ilmenau, Abteilung Plasmatechnik Meiningen, durchgeführt wurden [1].

Die Stromversorgungstechnik für eine solche Anlage (Bild 1) mit einem Investitionsanteil von 5 bis 10% des Gesamtaufwandes bringt jedoch, besonders im Hinblick auf eine verfahrenstechnisch und energiewirtschaftlich optimale Gestaltung und Betriebsweise einige zusätzliche Probleme für den Anwender.

Als Hauptprobleme lassen sich nennen:

1. Fragen des Betriebes von Plasmalichtbögen beim Übergang von veralteten Versorgungsanlagentechniken auf moderne Stromrichtereinheiten und die damit verbundene Bemessung der Hauptausrüstungsteile für die elektrische Stromversorgungstechnik.
2. Fragen der energetischen Anpassung zwischen Plasmalichtbogen als Verbraucher und Energieangebot der Stromversorgungseinrichtung. Hieraus folgt als direkte Konsequenz eine Minimierung der installierten Anlagenleistung, ein minimaler Blindenergiebedarf im stationären Betrieb, jedoch ein erhöhter technischer und energetischer Aufwand zur Zündung und Inbetriebsetzung des Plasmastrahlerzeugers.

Künftig wird gegenüber bestehenden Anlagen mit einer Erhöhung der erforderlichen Plasmastrahlleistung zu rechnen sein. Dies resultiert aus einem Trend zu erhöhten Aufspritzleistungen, sowie durch den Einsatz von Spritzmaterialien mit erhöhtem spezifischem Schmelzenergiebedarf. Damit verbunden sind Bemühungen, vom Mischgasbetrieb Ar/N_2 für Plasmastrahlerzeuger auf den billigeren Betrieb mit Stickstoff überzugehen [2]. Dies führt vorteilhafterweise zu einer Verminderung des technischen Aufwandes für die Gasversorgung und ermöglicht gleichzeitig eine Verbesserung des Plasmatronwirkungsgrades.

1. Energetische Betriebskennwerte von Plasmaspritzanlagen

Gebräuchliche Pulver, wie sie zum Plasmaspritzen eingesetzt werden [3], erfordern eine spezifische Energiedichte am Plasmatronausgang zwischen 3 und 5,5 kWh/m³ des plasmabildenden Gases.

Dr.-Ing. *Hans-Jürgen Scheibe*, Dipl.-Ing. *Hans-Dieter Musikowski* sind wissenschaftliche Assistenten an der Technischen Hochschule „Otto von Guericke" Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektrotechnologische Verfahren und Anlagen.

Entsprechend ergeben sich Plasmabogenleistungen zwischen 20 und 30 kW (Tafel 1). Bei alleinigem Betrieb mit Stickstoff ist bei gleicher Plasmatrongrundkonstruktion eine Leistungserhöhung auf Werte bis 40 kW sinnvoll möglich. In der Literatur werden auch Leistungen bis 50 kW angegeben [4].

Die Auswahl und Auslegung der elektrischen Versorgungseinrichtung richtet sich nach dem stationären Arbeitspunkt auf der Lichtbogencharakteristik $U_b = f(I_b)$ eines Plasmaspritzbrenners. Der Verlauf dieser Charakteristik ist von konstruktiven Größen, wie beispielsweise der Anodenlänge, ebenso abhängig wie von der Gaszusammensetzung und dem Gasdurchsatz. Für typische Gasdurchsätze zwischen 2 und 4 m³/h ($p_o = 10^5$ Pa; $T_o = 300$ K) zeigen die Bilder 2 und 3 einige gemessene Verläufe.

Für die beiden möglichen Betriebsweisen des gleichen Plasmatrontyps mit Mischgasbetrieb oder Stickstoff werden in der Tafel 2 abgeleitete Arbeitsbereiche und günstige Bogennennparameter gegenübergestellt. Entsprechend den Charakteristiken in den Bildern 2 und 3 ergeben sich erprobte Bogenleistungswerte von 34 kW bei Stickstoff und 28 kW bei Mischgasbetrieb. Charakteristisch sind die in weiten Bereichen des Lichtbogenstromes abnehmende bis konstante Bogenspannung. Diese Abhängigkeit erfordert zur Stabilisierung des Arbeitspunktes eine geregelte Stromversorgung, wie sie für diesen Anwendungsfall vorzugsweise durch stromgeregelte

Tafel 1. Technologische Betriebskenngrößen ausgewählter Plasmaspritzprozesse nach [3]

Spritzwerkstoff	P_b in kW	h bei $\eta = 0{,}5$ in kWh/m³	Gaszusammensetzung Ar/N_2 in Vol.-%
W_2C; WC (HVK 03; HV 40) und NiCrBSi (MPA 551)	27	3,8	65/35
W	27	5,4	65/35
Mo	25	5,0	65/35
$Al_2O_3 + TiO_2$	25	5,4	65/35
$ZrO_2 + CaO$	25	5,4	65/35
$ZrSiO_4$	25	5,0	65/35
Ni	18	3,0	65/35
Spezialpu ver [2]	30	6,2	0/100

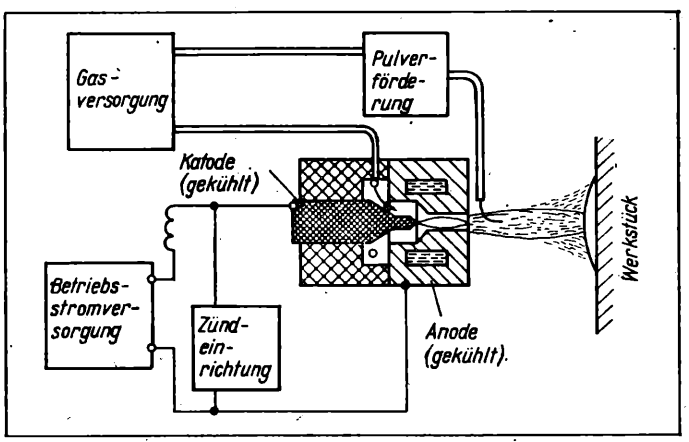
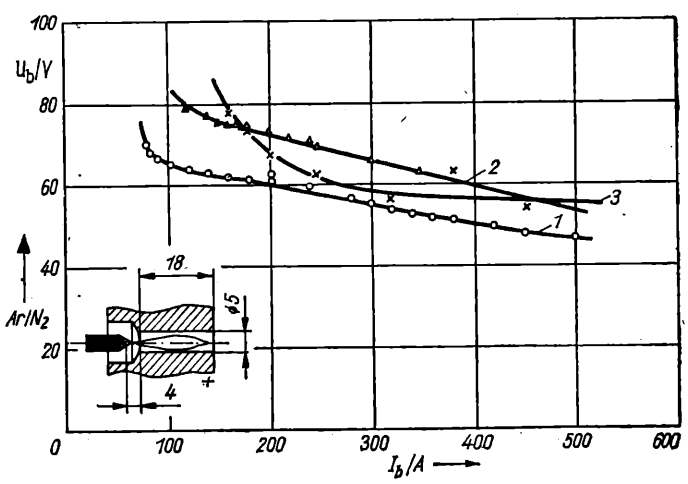
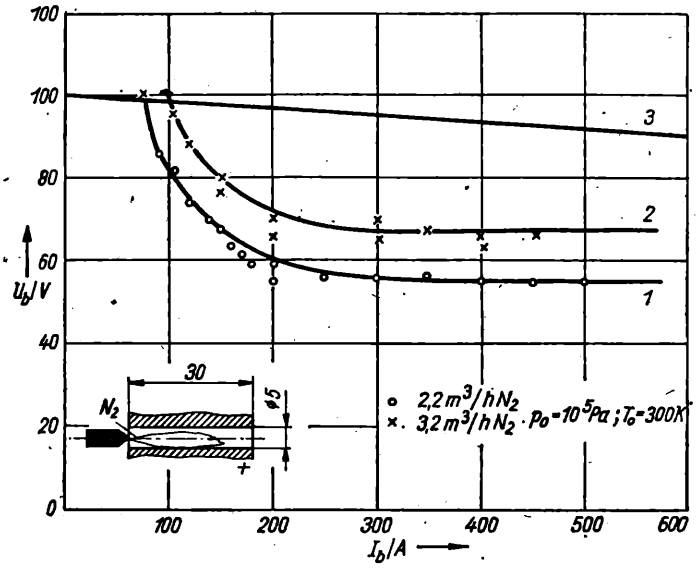


Bild 1. Grobschema einer P asmaspr tzanlage

Bild 2. Lichtbogencharakteristiken
$U_b = f(I_b)$ für ein Ar/N_2-Gemisch von 65/35 Vol.-%; *1*: 2 m³/h; *2*: 3 m³/h; *3*: 4 m³/h





Plasmagas	Ar/N_2	N_2
$U_{b,N}$ in V	45 ... 60	55 ... 68
$I_{b,N}$ in A	400 ... 500	400 ... 500
P_b in kW	20 ... 28	22 ... 34
Gasdurchsatz in m³/h	2 ... 4	2 ... 3

Tafel 2. Zweckmäßige Betriebsparameter von Plasmaspritzbrennern (erprobte Wertebereiche)

Tafel 3. Zuordnung von Leistungskenngrößen der Stromversorgung zu Lichtbogenparametern

Plasmagas	Bogen		Stromversorgung		Drossel L_d bei Pulszahl p			
	$P_{b,N}$ kW	$U_{b,N}$ V	U_{dio} V	P_N kW	$p=3$ mH	D14 Stck.	$p=6$ mH	D14 Stck.
Ar/N_2	30	55	80	45	4,6	5	1,2	2 (1)
N_2	34	68	100	50	6,3	7	1,6	2

Thyristorstromrichter in Drehstrombrückenschaltung repräsentiert wird.

2. Festlegung der Leistungskennwerte der Betriebsstromversorgung

Eine optimale Gestaltung und Auslegung der Betriebsstromversorgung setzt eine gute Reproduzierbarkeit der dargestellten stationären Lichtbogencharakteristiken voraus. Dabei sollten Abweichungen von ± 5% der stationären Bogenspannung im Arbeitsbereich nicht überschritten werden. Dies wird vor allem durch hinreichende Konstanz des Gasdurchsatzes erreicht.

Die günstigen Betriebskennwerte, wie minimaler Blindenergiebedarf und hohe Auslastung der installierten Anlagenleistung, werden besonders in der Nähe der maximalen Stromrichterausgangsspannung bei Nennstrom erreicht. Der praktisch sinnvolle Arbeitsbereich der Lichtbogenspannung bei Nennstrom bewegt sich zwischen 0,75 und 0,9 der maximalen Stromrichterausgangsspannung. In diesem Bereich können betriebsmäßig auftretende Störungen, wie sie durch Schwankungen im Lichtbogenbrennverhalten oder in der Netzspannung auftreten, ausgeregelt werden.

Einen weiteren Schwerpunkt für die Gestaltung der Stromversorgungseinrichtung stellt die Bemessung der erforderlichen Gleichstrominduktivität L_d dar. Ihr kommt die Aufgabe zu, die betriebsmäßigen Störungen im Lichtbogenbrennverhalten und die Spannungsschwankungen durch Phasenanschnittsteuerung auszugleichen. Für Plasmabögen erweist sich im Hinblick auf ausreichende Konstanz der Plasmabogenleistung und damit auch Plasmastrahlleistung eine Bogenstromwelligkeit zwischen 2 und 4% als zweckmäßig. Die Bemessung sollte nach (1) erfolgen.

$$L_d \approx \frac{U_{d,\max} w_u}{w_{i,\mathrm{zul}} I_b 2\pi f p}. \quad (1)$$

Die errechenbaren Induktivitäten nehmen erheblich höhere Werte an, als dies im Anwendungsbereich der Lichtbogenschweißung erforderlich wäre.

Zum Einsatz kommen vorzugsweise Glättungsinduktivitäten vom Typ D14 mit einem Nennstrom bis 750 A und einem Induktivitätsnennwert von 0,4 mH.

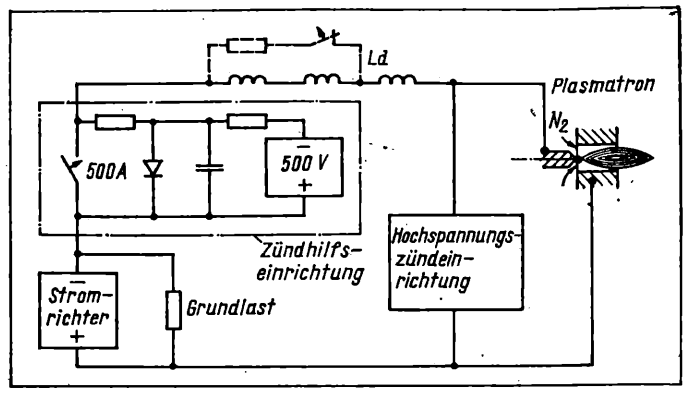


Bild 4. Struktur und Einordnung einer Zündhilfseinrichtung in den Grundstromkreis einer Plasmaspritzanlage

Bild 3. Lichtbogencharakteristiken $U_b = f(I_b)$ für Stickstoffbögen
1: 2,2 m³/h; *2*: 3,2 m³/h; *3*: maximale Stromrichterausgangskennlinie

Für die in der Tafel 2 gegenübergestellten Betriebsweisen im Mischgasbetrieb oder Betrieb mit Stickstoff zeigt Tafel 3 die erforderlichen Induktivitätswerte sowohl für 3- als auch für 6pulsige Stromrichtereinheiten.

Als Stromversorgungseinrichtung für Plasmaspritzanlagen können aus der DDR-Produktion zwei Stromrichtertypen als prinzipiell geeignet angesehen werden.

Besonders kostengünstig, jedoch mit erhöhtem Modifizierungs- und Anpassungsaufwand seitens des Anwenders sind Schweißgleichrichter des VEB Schweißtechnik Finsterwalde, insbesondere der Typ G 1000 VC, anzusehen. Modifizierungen werden im Hinblick auf die gleichstromseitigen Nenndaten, wie ein verändertes Transformatorübersetzungsverhältnis und veränderte Ventilschutzbeschaltung, notwendig. Als deutlich nachteilig wirkt sich die geringe Pulszahl des Stromrichters aus, die gemäß (1) eine erhöhte Anzahl von Glättungsinduktivitäten zur Folge hat und wie noch zu erläutern ist, auch den Energieaufwand für die Zündung des Plasmabogens stark vergrößert.

Als elegantere, wenn auch deutlich kostenintensivere Lösung für eine Stromversorgung ist der Einsatz von sechspulsigen Stromrichtern der Typenreihe DT vom VEB Elektroprojekt und Anlagenbau anzusehen. Günstig wirkt sich für den Anwender aus, daß dieser Stromrichter nicht modifiziert zu werden braucht.

Es ist jedoch notwendig, einen den speziellen Anpaßbedingungen gemäß Tafel 3 genügenden Transformator getrennt zu beschaffen und vorzuschalten. Ein erhöhtes Maß an Einrichtungen zur Meldung und Überwachung ist bereits in diesem Stromrichter integriert. Dies ist als vorteilhaft und ausreichend für den Betrieb von Plasmaspritzanlagen anzusehen. Der im Vergleich zur 3pulsigen Stromrichtervariante deutlich geringere Aufwand an gleichstromseitigen Glättungsinduktivitäten hat zur Folge, daß sich der Flächenbedarf beider Stromquellen insgesamt kaum unterscheidet.

3. Zusätzliche Maßnahmen zur Plasmabogenzündung

Der technologische Ablauf beim Plasmaspritzen erfordert eine Zündhäufigkeit, die in weiten Bereichen streuen kann (Minuten- bis Stundenabstände).

Mit Stromrichtereinheiten ausgerüstete Plasmaspritzanlagen weisen sowohl aus Gründen der energetischen Anpassung als auch wegen der notwendigen Glättungsinduktivitäten prinzipiell einen höheren Zündenergiebedarf auf als ältere widerstandsstabilisierte Anlagen. Daraus leitet sich ab, daß zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, wenn industrielle Zündeinrichtungen, wie sie für das WIG-Schweißen gebräuchlich sind, eingesetzt werden sollen.

Die Beherrschung des Zündprozesses erweist sich insbesondere beim Betrieb mit Stickstoff als problematisch. Bei Mischgasbetrieb kann zur Zündung auf Argon übergegangen werden, das einen geringeren Zündenergiebedarf aufweist.

Beim Betrieb der Anlage mit Stickstoff und fehlender Argonversorgung müssen elektrische Hilfseinrichtungen zur Inbetriebnahme eingesetzt werden. Sie finden auch Anwendung bei Anlagen mit erhöhtem gleichstromseitigem Glättungsaufwand (vgl. Tafel 3). Hierfür können einzeln oder kombiniert beitragen:

— zeitweise Reduzierung des Gasdurchsatzes auf Werte zwischen 0,5 bis 1 m³/h bei gleichzeitiger Reduzierung des Stromsollwertes auf Werte bis 300 A
— zeitweise Reduzierung der wirkenden Glättungsinduktivität durch Überbrückung mit Widerständen
— Einsatz einer Zündhilfseinrichtung mit kapazitivem Energiespeicher in Reihenschaltung zur Betriebsstromversorgung.

Alle drei Maßnahmen bewirken eine erhebliche Reduzierung des Zündenergiebedarfs aus der eigentlichen Hochspannungszündquelle. Unabhängig davon ist wegen der erheblich höheren Durchschlagfestigkeit des Gases gegenüber Argon eine gesteigerte Leistungsfähigkeit der Zündeinrichtung bei der Zündung von Stickstoffbögen notwendig.
Für das erläuterte Beispiel einer Plasmaspritzanlage mit Stickstoffbogen zeigt Bild 4 ein zweckmäßiges Schaltungsprinzip unter Einbeziehung der Zündhilfseinrichtung.
Der Gesamtenergieaufwand, der aus der Hochspannungszündquelle und der Zündhilfseinrichtung zusammen aufgebracht werden muß, um einen Zündprozeß einzuleiten, läßt sich durch (2) näherungsweise berechnen [5]:

$$W_z \approx L_d \, i_{b,\,\min}^2 \qquad (2)$$

Hierbei ist der Strom $i_{b,\,\min}$ der Wert, bei dem die statische Lichtbogencharakteristik des Plasmabogens die maximale Ausgangscharakteristik des Stromrichters unterschreitet (vereinfacht bei dem die Lichtbogenspannung den Wert U_{dio} erreicht). In der in Bild 4 dargestellten Schaltungsvariante wird dieser Energiebedarf überwiegend durch die Zündhilfseinrichtung gedeckt. Bei einer Nennspannung von 500 V für die Zündhilfseinrichtung lassen sich für die in der Tafel 3 angegebenen Betriebskenngrößen für Stickstoffbögen variantenabhängig notwendige Kapazitätswerte zwischen 80 und 400 µF bestimmen. Die daraus resultierenden Speicherenergien sind notwendig, um einen einzelnen Zündprozeß sicher ablaufen zu lassen.
Zum Schutz der Anlage ist dabei zu gewährleisten, daß bei Einleitung des Zündprozesses die Stromrichterventile leitend sind, was durch Grundlastwiderstände, Reglerbeschaltung und Verriegelungsbedingungen erreicht werden kann.

4. Zusammenfassung

Für die Entwicklung wie auch für die Rekonstruktion von Plasmaspritzanlagen stehen geeignete Stromversorgungseinrichtungen aus der DDR-Produktion zur Verfügung. Abhängig von den jeweiligen Möglichkeiten des Anwenders lassen sich sowohl Antriebsstromrichter als auch Schweißgleichrichter verwenden. Zur Anpassung an den Plasmaspritzprozeß notwendige Modifizierungen sind auch durch den Anwender möglich, jedoch für die aufgeführten Stromrichtervarianten unterschiedlich.
Bei Betrieb einer Plasmaspritzanlage allein mit Stickstoff sind zur Sicherung einer zuverlässigen Zündung des Plasmalichtbogens zusätzliche Maßnahmen erforderlich.
Eine zweckmäßige Zusatzspannungsquelle ist in der gezeigten Weise einzuordnen.

Literatur

[1] *Hantzsche, H.:* Untersuchungen über den Einfluß der wesentlichen Einstell- und Teilchenparameter auf einige Eigenschaften plasmagespritzter Wolframkarbidschichten. Dissertation A, TH Ilmenau 1981
[2] *Kranz, E.:* Pers. Mitt. Techn. Hochschule Ilmenau, Abt. Plasmatechnik Meiningen
[3] Wissensspeicher Plasmatechnik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1983
[4] *Donskoj, A. W.; Klubnikin, W. S.:* Elektroplasmaprozesse und Einrichtungen im Maschinenbau (russ.). Maschinenbau, Leningrad 1979
[5] *Scheibe, H.-J.:* Die elektrische Zündung von indirekten Gleichstrom-Hochleistungs-Plasmatrons. Dissertation A, TH Magdeburg 1984

EA 5641

Nukleare Analytik an metallischen Werkstoffen

W. Rudolph; K. Hennig; S. Niese; Rossendorf

Nukleare Analysenverfahren, die auf dem Beschuß der zu untersuchenden Probe mit Neutronen oder hochenergetischen Ionen basieren, werden vielfach für die Untersuchung von metallischen Werkstoffen, Halbleitern und Isolatoren eingesetzt. Mit diesen Analysenmethoden können Aussagen über die Probenzusammensetzung, über Tiefenverteilungen spezieller Elemente und zur Struktur der beschossenen Proben erhalten werden. Diese Aussagen sind für Anwendungsprobleme von grundlegender Bedeutung, da die mechanischen, elektrischen, optischen ... Eigenschaften der Materialien stark von diesen Größen abhängen können. In dieser Arbeit werden die Methoden kurz vorgestellt und durch Beispiele einige Anwendungsmöglichkeiten angegeben.

1. Zum Prinzip

Grundlage der hier betrachteten Analysenmethoden, die im ZfK Rossendorf routinemäßig eingesetzt werden, sind der Forschungsreaktor als intensive Neutronenquelle und die Teilchenbeschleuniger (Zyklotron, Tandemgenerator und 2-MV-Generator) zur Erzeugung hochenergetischer Ionenstrahlen. Durch den Beschuß mit Neutronen oder hochenergetischen Ionen wird die zu untersuchende Probe zur Emission von Strahlung angeregt. Diese Strahlung wird mittels wellenlängen- oder energiedispersiver Verfahren gemessen. Art und Energie bzw. Wellenlänge der Strahlung liefern Aussagen über die in der Probe enthaltenen Elemente bzw. Isotope, während aus der Intensität auf die entsprechenden Gehalte geschlossen werden kann. In bestimmten Fällen sind weiterhin Aussagen über den strukturellen Aufbau der Probe möglich.
Die ungeladenen Neutronen zeigen für die meisten Materialien eine hohe Durchdringungsfähigkeit. Mit diesen Projektilen können daher relativ dicke Proben untersucht werden. Neutronen werden besonders für die Aktivierungsanalyse (NAA — neutron activation analysis) und für Untersuchungen mittels der Neutronenstreuung eingesetzt. Dabei werden durch Kernreaktionen radioaktive Atomkerne erzeugt, die bei ihrem Zerfall charakteristische Kernstrahlung aussenden; oder die an der Probe gestreuten Neutronen werden gemessen.
Die Ionen werden in der Probe stark gebremst, und die Ionenenergie ist abhängig von der Eindringtiefe. Dabei bewegen sich die hochenergetischen Ionen längs geradliniger Bahnen, weil die Bremsung überwiegend durch elektronische Wechselwirkungsprozesse erfolgt. Deshalb auch läßt sich für die Ionen in der Probe eine Energie-Tiefe-Beziehung angeben; die mittlere Ionenenergie wird

$$E(x) = E(x = o) - \int S(E)\,\mathrm{d}\,x. \qquad (1)$$

x beschreibt die Tiefenkoordinate und

$$S(E) = \frac{\mathrm{d}\,E}{\mathrm{d}\,x}$$

ist der spezifische Energieverlust, welcher von Art und Energie des Ions und vom Probenmaterial abhängt. Aufgrund der Bremsung haben die Ionen eine sehr begrenzte Reichweite und sind besonders für die Untersuchung oberflächennaher Probenbereiche ($x \lesssim 1 \cdots 2$ µm) geeignet. Die Anregung der Strahlungsemission mit hochenergetischen Ionen ist Grundlage mehrerer Analysenverfahren. Ausgehend von der zum Nachweis genutzten Strahlung unterscheidet man

— die Aktivierungsanalyse mit geladenen Teilchen (CPAA — charged particle activation analysis), wobei radioaktive Atomkerne durch den Ionenbeschuß erzeugt werden
— prompte Kernreaktionen (P_NRA — promt nuclear reaction analysis), bei denen geladene Finalteilchen, Neutronen und auch

Dr. sc. nat. *Werner Rudolph* ist Abteilungsleiter, Prof. Dr. sc. nat. *Klaus Hennig* ist 1. Stellvertreter des Institutsdirektors, Prof. Dr. sc. nat. *Siegfried Niese* ist stellvertretender Bereichsleiter am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf der AdW der DDR.

γ-Quanten im Ergebnis von Kernumwandlungen emittiert werden
- die Ionenrückstreuung (RBS — Rutherford backscattering spectroscopy), die die rückgestreuten Ionen für die Analyse nutzt
- die Rückstoßatom-Spektroskopie (ERD — ejected recoil detection), bei der Probenatome durch Stöße mit schwereren Ionen z.B. 30 MeV Cl-Ionen) aus der Probe herausgestoßen und für die Analyse ausgenutzt werden
- die ioneninduzierte Röntgenemission (IIXE — ion induced x-ray emission), bei der insbesondere Protonen für die Strahlungsanregung eingesetzt und die charakteristische Röntgenstrahlung für den Elementnachweis genutzt wird.

Es soll noch darauf hingewiesen werden, daß mittels der betrachteten nuklearen Analysenmethoden keine Aussagen über den chemischen Zustand erhalten werden.

2. Anwendungsbeispiele

Makroskopische Eigenschaften verschiedenster Stahlsorten hängen stark von der Textur, d.h. von der Orientierungsverteilung der Kristallite in der Probe (z.B. Blech, Draht) ab. Die Textur bestimmt z.B. die Tiefziehfähigkeit von Karosserieblechen sowie die elektromagnetischen Eigenschaften von Transformator- und Dynamoblechen.

Unter Ausnutzung der Bragg-Reflexion kann die Textur mittels n-Streuung bestimmt werden [1]. Es wurden Textur-Untersuchungen in Abhängigkeit von der Prozeßführung (Kalt- oder Warmwalzen, Glühen . . .) durchgeführt und Aussagen zur Orientierungsdichte der Hauptkomponenten für verschiedene thermomechanische Behandlungen erhalten und damit eine Optimierung des technologischen Prozesses erreicht [1].

Die Verwendung von Neutronen anstelle von Röntgenstrahlung ist besonders von Vorteil, wenn integrale Aussagen über größere Probenvolumina (1 bis 1000 mm³) interessieren. Röntgenstrahlen der erforderlichen Wellenlänge dringen nur etwa 10 bis 100 µm in die Probe ein, während Neutronen gleicher Wellenlänge bis zu 1 cm der in der Hauptsache interessierenden Substanzen, wie Fe, Al, Cu, u.a., durchdringen.

Anwendungen der Aktivierungsanalyse werden für viele Industriezweige durchgeführt. Beispiele sind die Untersuchung von Reaktormaterialien (Graphit, Aluminium, Zirkonium), von Metallen, welche durch Zonenschmelzen gereinigt wurden (Aluminium, Eisen) und von Grundmaterialien der Mikroelektronik (Germanium, Silizium) [2]. Weitere Anwendungen betreffen geologische und kosmische Materialien und biologische Proben. In letzter Zeit wurden keramische Werkstoffe und Stahlproben häufig untersucht. Dabei sind Nachweisgrenzen bis in den ppm-Bereich, in günstigen Fällen bis in den ppb-Bereich erreichbar. Diese Nachweisempfindlichkeiten basieren u.a. auf der Möglichkeit der Verwendung relativ großer Probenmengen, aufgrund der großen Durchdringungsfähigkeit der Neutronen. Durch Kopplung der Neutronenaktivierungsanalyse mit Schichtabtragtechniken sind weiterhin auch Aussagen zu Tiefenprofilen möglich.

Die ioneninduzierte Röntgenemission ist besonders für Übersichtsanalysen geeignet [3]. Mit dieser Methode lassen sich Fremdatome in einem großen Ordnungszahlbereich gleichzeitig nachweisen. Als ein Beispiel zeigt Bild 1 das Röntgenspektrum, das beim Beschuß einer dicken Be-Probe mit Protonen ($E_p = 1.2$ MeV) erhalten wurde. Mittels eines 102 µm dicken Mylar-Absorbers wurde die niederenergetische Strahlung stark geschwächt. Bild 2 zeigt das Röntgenspektrum eines dünnen Al-Targets (400 µg/cm²), welches mit Protonen ($E_p = 1.1$ MeV) beschossen wurde. Die Folie wurde aus Ausgangsmaterial des Reinheitsgrades 99.999% durch Walzen zwischen Ni-Blechen hergestellt. Die auftretenden Kontaminationen sind aus Bild 2 ersichtlich. Aussagen zu Tiefenprofilen sind bei dieser Methode durch Kopplung mit Schichtabtragung erhältlich.

Mittels Ionenrückstreuung können Tiefeninformationen ohne Schichtabtragung erhalten werden [4]. Bild 3 zeigt als ein Beispiel das Rückstreuspektrum eines Schichtsystems, das aus einer (Cr+Si+O)-Mischschicht + 45 *nm* Wolfram + 70 *nm* Aluminium auf dickem Kohlenstoff-Substrat bestand. Diese Probe wurde mit He-Ionen der Energie $E = 1.7$ MeV beschossen. Die Streuung der He-Ionen an Atomkernen unterschiedlicher Massenzahl liefert unterschiedliche Energien der rückgestreuten Ionen. Diese Ionenenergie wird durch Bremsung noch modifiziert. Aus derartigen Spektren wird die Zuordnung der verschiedenen Elemente zu den einzelnen Schichten erhalten. Die gefundene Cu-Kontamination ist in der (Cr+Si+O)-Mischschicht enthalten. Die beiden Sauerstoff-Linien entstehen durch eine Al-Oxidschicht an der Oberfläche und durch den O-Gehalt der Mischschicht. Durch He-Rückstreuung lassen sich Schichttiefen von etwa 0,5 bis 1 µm untersuchen ($E \gtrapprox 2$ MeV), während mit hochenergetischen Protonen größere Tiefenbereiche erfaßbar sind. Die Ionenrückstreuung ist besonders für den Nachweis schwerer Atome in der Probe geeignet.

Leichte Atome lassen sich dagegen mit Hilfe prompter Kernreaktionen nachweisen. Durch Messung der γ-Strahlung, die beim Beschuß der Probe mit Neutronen emittiert wird, können z.B. Aussagen über die Elemente B, C, N und O erhalten werden. Protonen (H-Ionen) werden für den Nachweis von F, Na und Al eingesetzt.

Bild 4 zeigt sogenannte Ausbeutefunktionen (γ-Intensitäten in Abhängigkeit von der Ionenenergie), die beim Protonenbeschuß dicker Zirkonium-, Gold- und Kupferproben erhalten wurden [5]. Diese Proben wurden mit Al_2O_3-Pulver poliert (mittlere Korngröße 0,3 µm) und anschließend gereinigt. Ziel der Messung war es, festzustellen, welche Al_2O_3-Rückstände in diesen Materialien verschiedener Härte zurückbleiben. Für diese Messung wurde die $^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$-Reaktion in der Nähe der $E_p = 992$ keV-Resonanz genutzt. Die Energiedifferenz $\triangle E = (E_p - 992\,\text{keV})$ ist hier ein Maß für die Tiefe, in der jeweils der Al-Nachweis erfolgt. Es ist klar ersichtlich, daß beim harten Zirkonium Al-Kontaminationen nur in Oberflächennähe gefunden werden. Im Kupfer sind dagegen Al-Rückstände noch in Tiefen $x \approx 1$ µm nachweisbar.

Spezielle Kernreaktionen, die durch schwerere Ionen (z.B. ^{15}N- und ^{19}F-Ionen) ausgelöst werden, können zum Nachweis von Wasserstoff eingesetzt werden [6]. Die H-Konzentration ist als Funktion der Tiefe meßbar. Als ein Beispiel zeigt Bild 5 das H-Tiefenprofil, das für eine dicke Si-Probe mit einer 100 nm dicken Si-Oxidschicht und einer 300 nm dicken Al-Schicht erhalten wurde. Die Oxidschicht wurde mittels anodischer Oxydation in einem Äthylenglykol-Elektrolyten hergestellt und anschließend wurde die Al-Schicht aufgedampft. Die Ausbeutefunktion zeigt einen intensiven H-Peak an der Al-Oberfläche, welcher durch H_2O- und Kohlenwasserstoff-Kontaminationen auf der Oberfläche verursacht wird. Die Al-Schicht enthält praktisch keinen Wasserstoff, während in der Si-Oxidschicht eine H-Konzentration von etwa 1 bis 5 Atom-%, abhängig von den Herstellungsbedingungen der Schicht, gefunden wird.

Mittels dieser Methode (^{15}N-Beschuß der Probe) sind Wasserstoffgehalte $\gtrsim 0{,}1$ At.-% in verschiedensten Materialien nachweisbar. Voraussetzung ist, daß die zu untersuchenden Proben eine geringe Oberflächenrauhigkeit aufweisen. Der erfaßbare Tiefenbereich beträgt etwa 1 bis 2 µm, in Abhängigkeit vom Probenmaterial.

3. Zusammenfassung

An einigen Beispielen wurden Anwendungsmöglichkeiten der nuklearen Analysenmethoden, die auf dem Beschuß mit Neutronen oder hochenergetischen Ionen beruhen, diskutiert bzw. demonstriert. Im ZfK Rossendorf werden diese speziellen Untersuchungsmethoden als Routineverfahren genutzt.

Literatur

[1] *Hennig, K.; Prokert, F.:* Kernenergie 25 (1982) 472
[2] *Niese, S.:* Kernenergie 25 (1982) 476
[3] *Mann, R.; Bauer, C.; Gippner, P.; Rudolph, W.:* J. Radioan. Chem. 50 (1979) 217
[4] *Rudolph, W.; Grötzschel, R.:* II. Symposium „Physikalische Grundlagen zu Bauelementetechnologien der Mikroelektronik". Frankfurt/O. 1982
[5] *Wolicki, E. A.:* Material Analysis By Means of Nuclear Reactions, in „New Uses of Ion Accelerators", ed. *J. F. Ziegler*, Plenum Press 1975
[6] *Rudolph, W. et. al.:* III. Symposium „Physikalische Grundlagen zu Bauelementetechnologien der Mikroelektronik", Frankfurt/O. 1984

EA 5642

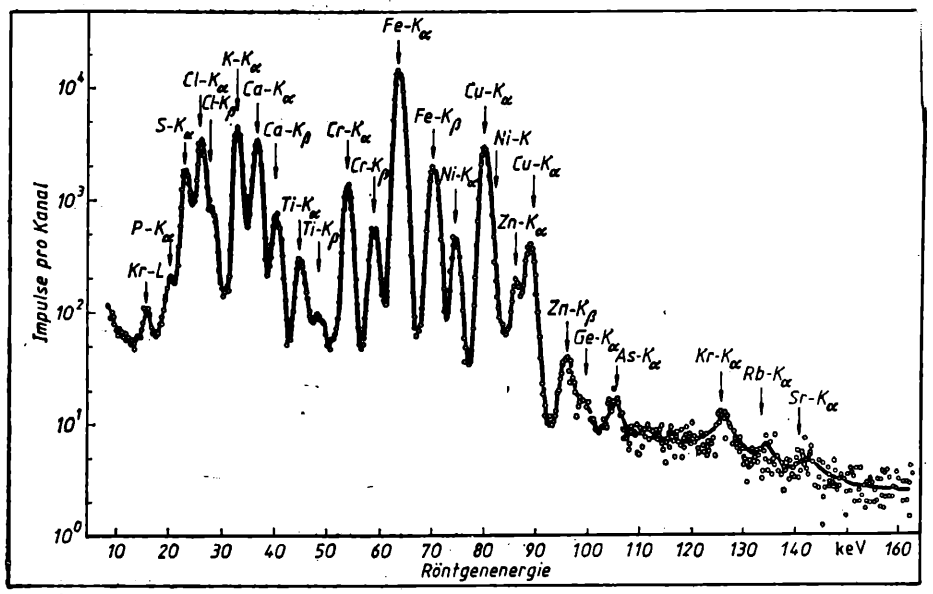


Bild 1. Röntgenspektrum eines dicken Be-Targets, das eine große Zahl von Verunreinigungen enthält. Protonenenergie E_p = 1.2 MeV, Absorber 102 μm Mylar

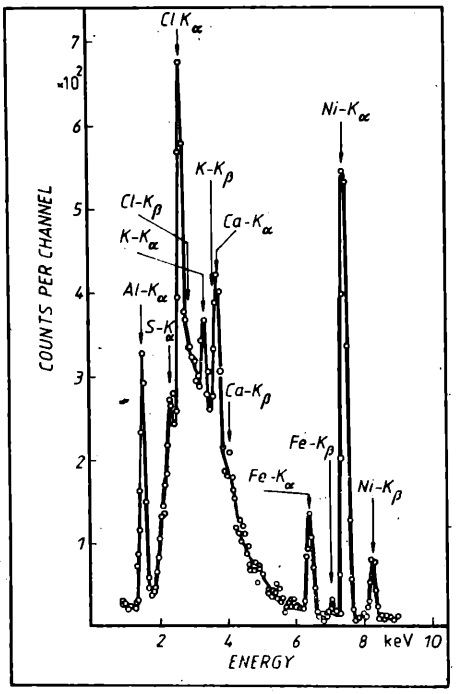


Bild 2. Röntgenspektrum eines dünnen Al-Targets (400 μm/cm²). Das Target wurde aus Ausgangsmaterial mit Reinheitsgrad 99.999 % durch Walzen zwischen Nickelblech hergestellt (E_p = 1.1 MeV, Absorber 51 Mylar). ▶

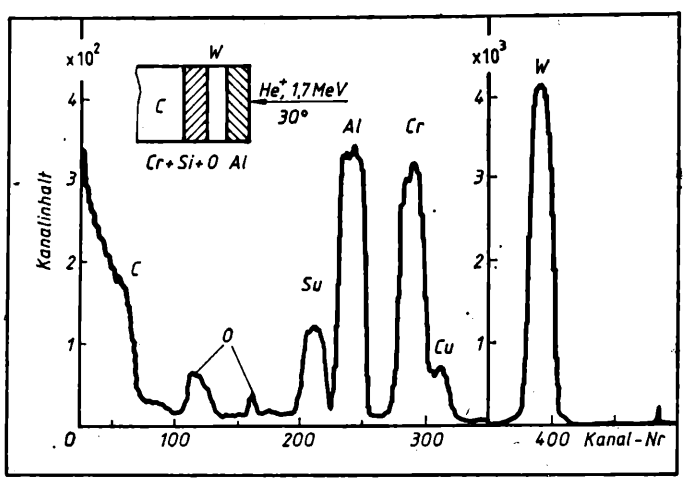


Bild 3. Rückstreuspektrum eines Schichtsystems aus (Cr + Si + O)-Mischschicht + 45 *nm* Wolfram + 70 *nm* Aluminium auf dickem C-Träger. He-Ionen mit E = 1.7 MeV wurden benutzt.

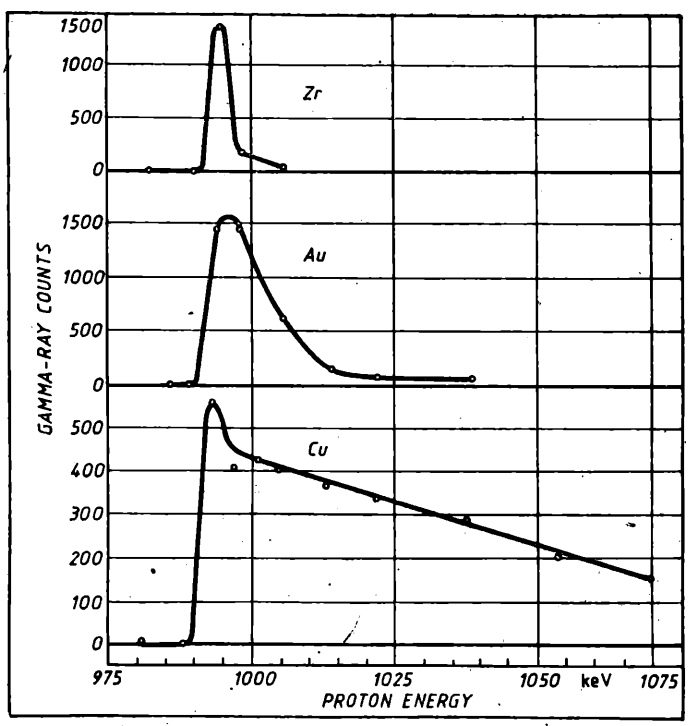


Bild 4. Ausbeutefunktionen der ^{27}Al (p, γ)^{28}Si-Reaktion, gemessen für Cr-, Au und Cu-Proben, welche mittels Al_2O_3-Pulver poliert wurden [5]. Die Energiedifferenz $\Delta E = E_p$ — 992 keV ist ein Maß für die Tiefenkoordinate. ▶

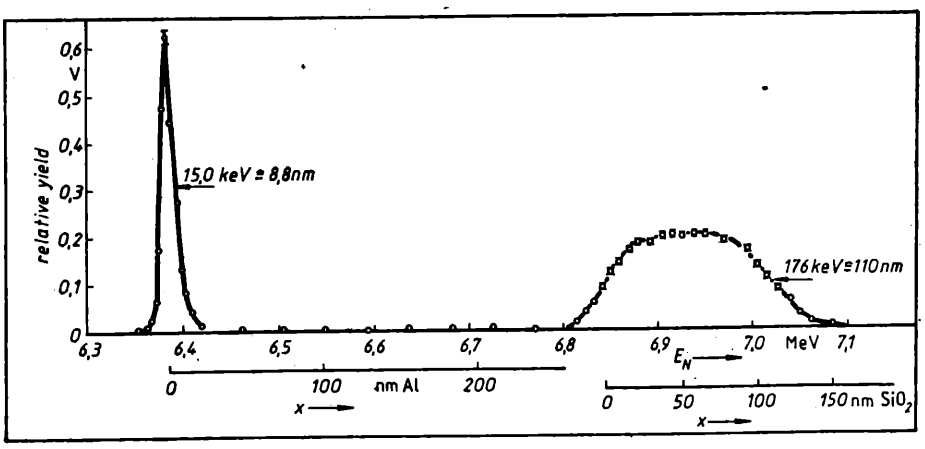


Bild 5. Wasserstoff-Ausbeutefunktion für ein Si-Oxid (100 *nm*) + Al-Schicht (300 *nm*)-Schichtsystem auf dickem Si-Träger, welches mit ^{15}N-Ionen beschossen wurde.

Der Einfluß der Verluste auf das zulässige Drehmoment stromrichtergespeister Asynchronmaschinen

P.-K. Budig, KDT, Karl-Marx-Stadt

Verwendete Formelzeichen

B	Induktion
f	Frequenz
$I_{1/2}$	Strom (Ständer-/Rotor-)
k_i	Stromverdrängungsfaktor des Blindwiderstandes
k_r	Stromverdrängungsfaktor des Wirkwiderstandes
m	normiertes Drehmoment
m	Masse
P_{mH}	spezifische Hysteresisverluste
P_{mW}	spezifische Wirbelstromverluste
$P_{Cu\,1/2}$	Stromwärmeverluste im Ständer/Rotor
R	Wirkwiderstand
U	Spannung
$V_{B,f}$	spezifische Eisenverluste
Z	Scheinwiderstand
α	Frequenzverhältnis
ε	Faktor
σ	Faktor
ν	Ordnungszahl
ψ	magnetischer Fluß
ω	Kreisfrequenz
Index *1*	Stator
Index *2*	Rotor

Drehstromasynchronmotoren werden für die Nennfrequenz 50 Hz (60 Hz) dimensioniert. Wird beim Stromrichterbetrieb eine höhere Frequenz eingeprägt, so geht man davon aus, daß die Ummagnetisierungsverluste den bei Nennbetrieb auftretenden Wert nicht überschreiten sollen. Mit der Annahme, daß diese proportional zum Quadrat der Frequenz sind, wird oberhalb der Nennfrequenz die Klemmenspannung konstant gehalten. Dadurch geht der magnetische Fluß umgekehrt proportional zur Frequenz zurück.
Andererseits steigen bei der Stromrichterspeisung die Stromwärmeverluste wegen der auftretenden Oberschwingungen in der Spannung an.
Im folgenden soll qualitativ untersucht werden, welchen Einfluß diese beiden Verlustanteile auf die Gesamtverluste der ASM haben.

1. Ummagnetisierungsverluste

Die Ummagnetisierungsverluste einer ASM errechnen sich in bekannter Weise nach Gl. (1):

$$P_m = V_{B,f} \cdot m \tag{1}$$

Dabei ist

$$V_{B,f} = \varepsilon \frac{f}{50}\left(\frac{B}{B_1}\right)^2 + \sigma\left(\frac{f}{50}\right)^2\left(\frac{B}{B_1}\right)^2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}}. \tag{2}$$

In Gl. (2) bedeutet

$$P_{mH} = \varepsilon \frac{\mathrm{f}}{50}\left(\frac{B}{B_1}\right)^2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}} \tag{3}$$

die spezifischen Hysteresisverluste und

$$P_{mW} = \sigma\left(\frac{f}{50}\right)^2 = \left(\frac{B}{\mathrm{B_1}}\right)^2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}}. \tag{4}$$

die spezifischen Wirbelstromverluste.

Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig*, Technische Universität, Karl-Marx-Stadt.

Bild 1
Betriebsdiagramm des ASM

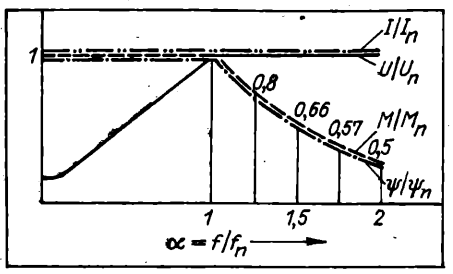
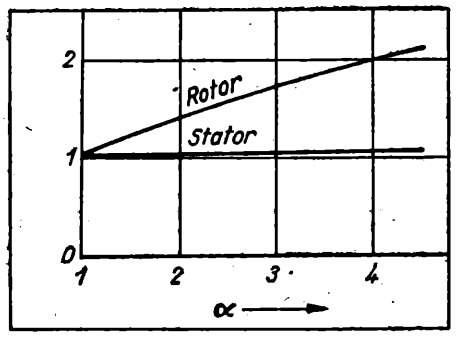


Bild 2
Normierte Stromwärmeverluste in Abhängigkeit von der Frequenz

$\varepsilon = \frac{f}{f_1} = \frac{f}{50}$



In der Annahme, daß der Wirbelstromanteil überwiegt, wird mit

$$U = \omega\psi = 2\pi f\psi \tag{5}$$

für den Bereich $f > f_n = 50$ Hz die Klemmenspannung konstant gehalten. Dann ergibt sich für den magnetischen Fluß:

$$\psi = \frac{U}{\omega} = \frac{1}{2\pi}\frac{U}{f} \tag{6}$$

Bei konstantem Ständerstrom folgt für das normierte Drehmoment:

$$m = \mathrm{Im}\{\psi \cdot I^{\times}\}. \tag{7}$$

Dieses sinkt wegen Gl. (6) mit steigender Frequenz.
Im Bereich $0 \leqq f \leqq f_n$ wird der magnetische Fluß konstant gehalten. Unter Berücksichtigung des endlichen ohmschen Ständerwiderstandes ergibt sich dann für die Spannung an den Motorklemmen der im Bild 1 dargestellte Verlauf. Es sind auch die Verläufe des Stroms, des magnetischen Flußes und des Drehmoments angegeben.
Wie Gl. (1) zeigt, ist die Annahme, daß nur Wirbelstromverluste auftreten, eine Näherung.

2. Stromwärmeverluste

Das Wärmeabgabevermögen einer ASM kann oberhalb der Nenndrehzahl als drehzahlunabhängig angenommen werden. Die in den aktiven Teilen auftretenden Verluste der Stromwärme und der Ummagnetisierung dürfen den bei Nenndrehzahl auftretenden Wert nicht überschreiten. Es ist bekannt, daß die Stromwärmeverluste bei Stromrichterspeisung sich aus denen der Grundschwingung

$$P_{Cu\,1} = 3\, I_1^2\, k_{r\,1}\, R_1 \tag{8}$$

und denen der Oberschwingungen

$$P_{Cu\,\nu} = 3\, I_\nu^2\, k_{r\,\nu}\, R_1 \tag{9}$$

zusammensetzen. Die Gl. (8) und (9) sollen die Verluste im Ständer und im Rotor ausdrücken.
Bekanntlich hängen die durch Oberschwingungen entstehenden Verluste nur von der Frequenz, nicht aber vom Moment ab. Je höher die Grundschwingungsfrequenz ist, desto höher sind auch die Frequenzen der Oberschwingungen. Da im allgemeinen oberhalb der Nennfrequenz — d.h. oberhalb 50 Hz — Wechselrichter getaktet (π-Einschaltung) betrieben werden, ergibt sich, daß die Amplituden der Harmonischen Spannungen mit (ν = Ordnungszahl der Harmonischen)

$$U_\nu = \frac{U_1}{\nu} \tag{10}$$

gehen. Die Ströme ergeben sich dann aus:

$$I_\nu = \frac{U_\nu}{Z_\nu}. \tag{11}$$

Der hinter den Motorklemmen erscheinende Scheinwiderstand des Motors ist:

$$Z_\nu = k_{r\nu} R_1 + \mathrm{j}\, k_{i\nu}\, \nu X_1. \tag{12}$$

Da der Blindanteil wegen seiner Frequenzabhängigkeit mit der Ordnungszahl rasch ansteigt, kann gesetzt werden:

$$\varepsilon\, k_{i\nu} X_1 \gg k_{r\nu} R_1. \tag{13}$$

Dann folgt für den Strom:

$$I_\nu = -j \frac{U_\nu}{\nu k_{i\nu} X_1} = \frac{U_1}{\nu^2 k_{i\nu} X_1} \tag{14}$$

Die Faktoren $k_{r\nu}$ und $k_{i\nu}$ berücksichtigen die Erhöhung des Wirkwiderstandes bzw. die Verringerung des Blindwiderstandes infolge der Stromverdrängung.
Es lassen sich die folgenden Tendenzen erkennen:

- Die Grundschwingungsverluste steigen mit der Frequenz an, da der Faktor $k_{r\nu}$ mit der Frequenz ansteigt.
- Die Oberschwingungsverluste werden mit steigender Grundschwingungsfrequenz kleiner. Sie verschwinden jedoch nicht. Zu beachten ist dabei, daß der Faktor $k_{r\nu}$ bei gegossenen Läuferstäben sehr stark frequenzabhängig ist. Er ist wesentlich größer als k_{r1}.

Im folgenden soll eine Abschätzung der Stromwärmeverluste vorgenommen werden.
Der Faktor $k_{r\nu}$ ist wegen

$$k_{r\nu} = \sqrt{f \nu \mu_0 \varkappa \frac{b}{b_n}} \tag{15}$$

proportional $\sqrt{f_\nu}$. Damit kann für die Verluste der Grundschwingungen, bezogen auf die bei 50 Hz auftretenden, geschrieben werden:

$$\frac{P_{Cuf1}}{P_{Cu50}} = \sqrt{\frac{f_1}{50}} \frac{I_1^2 R_1}{I_1^2 R_1} = \sqrt{\frac{f_1}{50}}. \tag{16}$$

Setzt man für das Frequenzverhältnis

$$\frac{f_1}{50} = \alpha \tag{17}$$

so folgt:

$$\frac{P_{Cu1f}}{P_{Cu50}} = \sqrt{\alpha}. \tag{18}$$

Für die Oberschwingungen gilt analog mit $f_\nu = \nu f_1$ (19)

$$\frac{P_{Cu\nu f1}}{P_{Cu50}} = \sqrt{\frac{\nu f_1}{50}} \frac{I_{1\nu}^2 R_1}{I_1^2 R_1}. \tag{20}$$

Daraus folgt mit Gl. (14)

$$\frac{P_{Cu\nu f1}}{P_{Cu50}} \sqrt{\frac{\nu f_1}{50}} \left(\frac{U_{1\nu}}{Z_\nu}\right)^2 \frac{1}{I_1^2}. \tag{21}$$

Das läßt sich umformen in:

$$\frac{P_{Cu\nu f_1}}{P_{Cu50}} = \sqrt{\nu \alpha} \left(\frac{U_{1\nu}}{\nu X_1 k_{i\nu}}\right)^2 \frac{1}{I_1^2} = \sqrt{\nu \alpha} \left(\frac{U_1}{\nu^2 k_{i\nu} X_1}\right)^2 \frac{1}{I_1^2} = \sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{\nu}}{\nu^4 k_{i\nu}^2} \tag{22}$$

Diese Betrachtung enthält die Ungenauigkeit der Vernachlässigung des Wirkwiderstandes in Gl. (12).
Nun lassen sich die Stromwärmeverluste im Rotor und im Stator angeben. Für den Rotor folgt:

$$\frac{P_{Cu1fR}}{P_{Cu50R}} + \frac{P_{Cu\nu f_1}}{P_{Cu50R}} = \sqrt{\alpha} + \sum_5^\infty \frac{1}{\nu^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\nu^3}} \frac{1}{k_{i\nu}^2} = \sqrt{\alpha}\left[1 + \sum_5^\infty \frac{\sqrt{\nu}}{k_{i\nu}^2 \nu^4}\right]. \tag{23}$$

Für den Stator sei angenommen, daß er stromverdrängungsfrei ist. Diese Annahme ist bei ASM mit Leistungen bis etwa 150 kW gerechtfertigt, da diese Runddrahtwicklungen im Stator haben. Dann gilt:

$$\frac{P_{Cuf1S}}{P_{Cu50S}} = 1 \tag{24}$$

für die Grundschwingung. Für die Oberschwingungen folgt:

$$\frac{P_{Cu\nu fS}}{P_{Cu50S}} = \frac{I_{1\nu}^2 R_{1S}}{I_{1,50}^2 R_{1S}} = \left(\frac{U_{1\nu}}{Z_{1\nu}}\right)^2 \frac{1}{I_{1,50}^2} = \left(\frac{U_1}{k_{i\nu} \nu^2 X_2}\right)^2 \frac{1}{I_{1,50}^2} = \frac{1}{k_{i\nu}^2 \nu^4}. \tag{25}$$

Die Summe der normierten Statorverluste ist schließlich:

$$\frac{P_{CufS}}{P_{Cu50S}} + \sum_5^\infty \frac{P_{Cu\nu fS}}{P_{Cu50S}} = 1 + \sum_5^\infty \frac{1}{\nu^4 k_{i\nu}^2}. \tag{26}$$

Die normierten Stromwärmeverluste des Stators und Rotors sind im Bild 2 dargestellt. Die Verluste im Stator sind konstant und größer als bei Sinus-Einspeisung. Die Verluste im Rotor hingegen steigen mit der Frequenz an.
Daraus folgt, daß in bekannter Weise der Strom zu reduzieren ist, damit bei der als konstant angenommenen Wärmeabgebefähigkeit der ASM die Verluste den zulässigen Wert nicht überschreiten. Da andererseits der magnetische Fluß mit $1/\alpha$ kleiner wird, folgt:

- das Moment sinkt mit $1/\alpha$ infolge der Flußschwächung
- das Moment sinkt weiterhin um das Maß, welches die oben beschriebene Stromreduzierung erfordert
- das Moment muß also stärker als mit $1/\alpha$ reduziert werden.
- die Leistung ist daher im Bereich oberhalb der Nennfrequenz nicht mehr konstant.
- Infolge der Stromverdrängung sinkt der Blindwiderstand mit steigender Frequenz, so daß die Ständerstromwärmeverluste relativ ansteigen.

3. Ummagnetisierungsverluste

Für den magnetischen Fluß gilt entsprechend:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{B_\alpha}{B_{50}}. \tag{25}$$

Damit folgt für die spezifischen Ummagnetisierungsverluste:

$$V_{f,B} = \varepsilon \frac{f}{f_{50}} \cdot \left(\frac{B_\alpha}{B_{50}}\right)^2 + \sigma \left(\frac{f}{f_{50}}\right)^2 \left(\frac{B_\alpha}{B_{50}}\right)^2 \tag{26}$$

Mit Gl. (25) folgt aus Gl. (26):

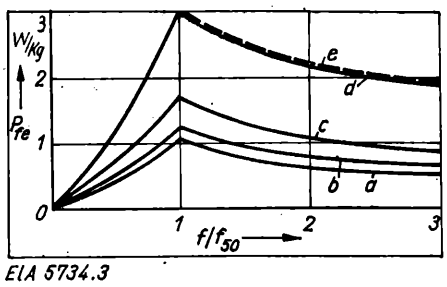
$$V_{f,B} = \varepsilon\, \alpha \frac{1}{\alpha^2} + \sigma\, \alpha^2 \frac{1}{\alpha^2}. \tag{27}$$

$$= \varepsilon \frac{1}{\alpha} + \sigma.$$

Für verschiedene Dynamoblechqualitäten (3,1; 1,7; 1,25; 1,1 W/kg und semi-finished-Blech) sind die Verlustziffern in Abhängigkeit von der Frequenz in Bild 3 aufgetragen. Werden diese Verläufe normiert auf den bei $\alpha = 1$ auftretenden Wert, so erhält man die Darstellung nach Bild 4. Mit steigender Frequenz werden also die Ummagnetisierungsverluste infolge der Flußabsenkung geringer.
Anders ausgedrückt war die einfach zu realisierende Flußabsenkung nicht in dem Umfang erforderlich. Einfach realisierbar ist sie deshalb, weil der gewünschte Effekt durch konstante Klemmenspannung erreicht wird. Wie aus Gl. (27a) zu erkennen ist, kann der magnetische Fluß größer gewählt werden. Das ist nur dann möglich, wenn die Wechselrichterausgangsspannung nicht konstant gehalten wird, sondern mit steigender Frequenz ansteigt. Dieser Anstieg geht jedoch nicht proportional zur Frequenz. Das zu realisieren erfordert, beim getakteten Wechselrichter die Eingangsspannung des maschinenseitigen Stromrichters zu erhöhen. Dazu ist entweder ein gestellter netzseitiger Stromrichter erforderlich, oder der Zwischenkreis muß einen Gleichstrompulssteller haben. Ersteres ist deshalb ungünstig, weil damit im Netz Blindleistung auftritt und so ein wesentlicher Vorteil des Spannungszwischenkreiswechselrichters verloren geht. Die Verwendung eines Pulsstellers bedeutet erhöhten Aufwand, der Volumen und Masse beansprucht. Es entstehen höhere Kosten.
Soll dennoch die Möglichkeit der Vergrößerung des magnetischen Flußes ausgenutzt werden, so bedeutet das, daß das Drehmoment gegenüber dem im Bild 1 gezeigten Verlauf erhöht werden kann. Der Effekt ist vom verwendeten Dynamoblechmaterial abhängig. Orientiert man auf konstante Ummagnetisierungsverluste, so kann das Drehmoment bzw. der Fluß — so wie in Bild 5 gezeigt — erhöht werden. Diese Betrachtung geht von konstantem Statorstrom aus.

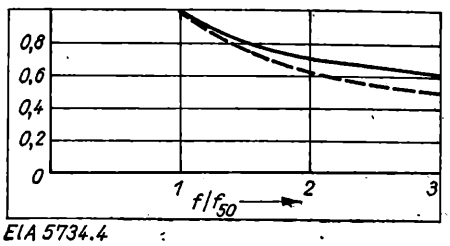
4. Zulässiges Drehmoment

Es ist gezeigt worden, daß infolge der Stromharmonischen und der Stromverdrängung die Stromwärmeverluste steigen. Die Ummagnetisierungsverluste sinken, wenn die Frequenz steigt. Im ersten Fall ist das Drehmoment zu verringern. Im zweiten Fall darf es erhöht werden. Die beiden gegenläufigen Effekte können sich also gegen-



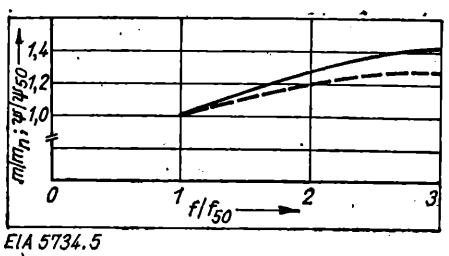
EIA 5734.3

Bild 3
Verluste für verschiedene Blechsorten in Abhängigkeit von der Frequenz
a 1,1 W/kg; *b* 1,25 W/kg; *c* 1,7 W/kg; *d* 3,1 W/kg; *e* BSFK



EIA 5734.4

Bild 4
Normierte Eisenverluste im Blech für 3,1; 1,7; 1,25 und 1,1 W/kg
--- 1,7/1,1/1,25 W/kg;
—— 3,1/BSFK



EIA 5734.5

Bild 5
Flußvergrößerung für konstante Eisenverluste
--- 3,1 W/kg BSFK;
—— 1,1 W/kg

Tafel 1. Verlustbilanz (normiert) für einen 12-kW- und einen 35-kW-Motor

		12-kW-Motor	35-kW-Motor
Verlustart			
Reibung/Ventilation	P_{vr}	0,08 P_v	0,08 P_v
Magnetisierung	P_m	0,38 P_v	0,32 P_v
Statorstromwärme	P_{cu1}	0,33 P_v	0,37 P_v
Rotorstromwärme	P_{cu2}	0,21 P_v	0,23 P_v

Tafel 2. Verlustbilanz (normiert) für die Drehzahlverhältnisse 1,5 bzw. eines 12-kW- und 35-kW-Motors

$\alpha = 1{,}5$		12-kW-Motor	35-kW-Motor
Verlustart			
Reibung/Ventilation	P_{vr}	0,08 P_v	0,08 P_v
Magnetisierung	P_m	0,285 P_v	0,240 P_v
Statorstromwärme	P_{cu1}	0,33 P_v	0,37 P_v
Rotorstromwärme	P_{cu2}	0,258 P_v	0,283 P_v
Summe		0,953 P_v	0,973 P_v
$\alpha = 2$			
Reibung/Ventilation	P_{vr}	0,08 P_v	0,08 P_v
Magnetisierung	P_m	0,247 P_v	0,208 P_v
Statorstromwärme	P_{cu1}	0,33 P_v	0,34 P_v
Rotorstromwärme	P_{cu2}	0,299 P_v	0,327 P_v
Summe		0,956 P_v	0,955 P_v

einander kompensieren. Im getakteten Betrieb geht dies nur durch Vergrößerung der Zwischenkreisspannung. Der erreichbare Gesamteffekt ist einerseits davon abhängig, wie groß der Anteil der Stromwärme- bzw. der Ummagnetisierungsverluste an den Gesamtverlusten ist, andererseits bestimmen die Veränderungen dieser beiden Verlustanteile infolge der Stromverdrängung, der Stromharmonischen und der Ummagnetisierung, wieweit eine Veränderung des zulässigen Drehmomentes möglich ist. Das soll am Beispiel eines 12-kW- und eines 35-kW-Motors betrachtet werden.

Die normierte Verlustbilanz zeigt Tafel 1. Die Ergebnisse nach Tafel 2 zeigen bei beiden untersuchten Motoren eine Verringerung der Gesamtverluste. Das bedeutet, daß eine Erhöhung (3 bis 5%) des Drehmomentes in Anspruch genommen werden kann. Eine weitere Änderung ergibt sich nur dann, wenn der Stromverdrängungseffekt im Rotor verringert werden kann. Das wiederum ist nur möglich, wenn anstelle des Doppelkäfigs ein Rund-, Rechteck- oder Keilstab verwendet wird. Es muß also vom serienmäßigen Rotor abgewichen werden.

Für die normierten Ummagnetisierungs- bzw. Stromwärmeverluste ergeben sich mit den Bildern 2 bzw. 4

— bei $\alpha = 1{,}5$ $P_m/P_{mn} = 0{,}75$

$P_{cu2}/P_{cu2\,n} = 1{,}232$

— bei $\alpha = 2$ $P_m/P_{mn} = 0{,}65$

$P_{cu2}/P_{cu2\,n} = 1{,}423.$

Mit diesen Werten und den Angaben nach Tafel 1 lassen sich nun die bei den angegebenen Drehzahlverhältnissen auftretenden Verlustbilanzen bestimmen. Das Ergebnis zeigt Tafel 2.

5. Zusammenfassung

Eine qualitative Betrachtung der stromrichtergespeisten ASM zeigt, daß bei Betrieb oberhalb der Nenndrehzahl, wenn mit konstanter Klemmenspannung gearbeitet wird, die Ummagnetisierungsverluste kleiner als die bei Nennbetrieb auftretenden sind. Andererseits treten erhöhte Stromwärmeverluste vor allem im Rotor auf. In zwei untersuchten Fällen zeigt sich eine Verringerung der Gesamtverluste um 3 bis 5%. Das kann nicht als allgemeingültige Aussage gelten, sondern zeigt lediglich die Tendenz. In jedem Fall ist es erforderlich, die Verluste im Motor genau zu bestimmen. Allerdings wird dieses Ergebnis nur erreicht, wenn von der Betriebsweise mit konstanter Spannung oberhalb der Nenndrehzahl abgegangen wird. Das erfordert, einen gestellten netzseitigen Stromrichter, der Nachteile für die Netzbelastung mitsich bringt.

Literatur

[1] *Budig, P.-K.; Muster, J.; Zimmermann, R.:* Beanspruchung von Asynchronmaschinen durch Stromrichterspeisung. ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 9, S. 462 bis 466

[2] *Budig, P.-K.; :* Drehzahlvariable elektrische Antriebe zur Lösung von Antriebsaufgaben im Be- und Verarbeitungsmaschinenbau. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 10, S. 509—514

[3] *Budig, P.-K.:* Drehzahlgestellte Drehstromasynchronmotoren. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 11, S. 416—419

[4] *Budig, P.-K.:* Stromwärmeverluste und ihre Minimierung bei stromrichtergespeisten Asynchronmotoren. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 12, S. 464—466

[5] *Budig, P.-K.:* Einfluß der Stromverdrängung in Asynchronkurzschlußläufermotoren auf die Erwärmung und das zulässige Drehmoment. ELEKTRIE, Berlin 40(1986) 1, S. 30—31

[6] *Muster, J.:* Beanspruchung umrichtergespeister Asynchronmaschinen. Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt 1984

EA 5734

Hinweise für alle Bezieher im Ausland!

Bitte erneuern Sie rechtzeitig Ihr Abonnement für die Fachzeitschrift ELEKTRIE, damit Sie sich für 1987 wieder den Bezug aller Ausgaben sichern.

Wir freuen uns, daß Sie auch weiterhin zu den regelmäßigen Lesern unserer Publikation gehören.

Theorie des dynamischen Verhaltens von Asynchronmotoren mit Hochstabläufer

U. Beckert; W. Neuber; Freiberg

Mitteilung aus der Bergakademie Freiberg,
Bereich Elektrotechnik

Es ist bekannt, daß bei dynamischen Vorgängen in Antrieben mit Asynchronmotoren Strom- und Drehmomentbeanspruchungen auftreten können, die ein Mehrfaches des Nennwertes betragen. Ihre Kenntnis ist für eine betriebssichere Projektierung dieser Antriebe — z. B. für die Dimensionierung der Getriebe und Kupplungen — unerläßlich.

Da im nichtstationären Betrieb die Läuferwinkelgeschwindigkeit nicht mehr als konstant vorausgesetzt werden kann, gelten die dadurch nichtlinearen Spannungsdifferentialgleichungen für die Ständer- und Läuferwicklungen nicht unabhängig von den Bewegungsdifferentialgleichungen des mechanischen Systems.

Auch bei Vernachlässigung der Stromverdrängungs- und Sättigungserscheinungen kann das Differentialgleichungssystem im allgemeinen nicht mehr geschlossen, sondern nur numerisch gelöst werden.

Weil im nichtstationären Betrieb von einem beliebigen zeitlichen Verlauf der Läuferströme auszugehen ist, versagt beim Asynchronmotor mit Hochstabläufer darüber hinaus das auf der Annahme eines zeitlich sinusförmigen Stabstromes beruhende Verfahren, die Stromverdrängungserscheinungen in den Läuferstäben durch frequenzabhängige Stabwiderstände und Nutstreuinduktivitäten zu erfassen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein gleichungsorientiertes Verfahren zur digitalen Simulation des dynamischen Verhaltens von Asynchronmotoren mit Hochstabläufer beschrieben. Die zentrale Idee dieses Verfahrens besteht darin, daß die partielle Wirbelstromdifferentialgleichung, die die Stromverdrängungserscheinung im Hochstab beschreibt, in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen überführt und dieses Differentialgleichungssystem simultan mit den Spannungsdifferentialgleichungen von Ständer und Läufer und den Bewegungsdifferentialgleichungen numerisch integriert wird.

1. Voraussetzungen

Die Systemgleichungen werden unter folgenden Voraussetzungen abgeleitet:

- Die Wirbelstrom- und Hystereseerscheinungen im magnetischen Kreis werden vernachlässigt.
- Die symmetrisch angeordnete, dreisträngige Ständerwicklung ist an ein starres Netz mit zeitlich beliebig verlaufenden Spannungen angeschlossen.
- Die Ständer- und Läuferwicklung sind nur über die Grundwelle des Luftspaltfeldes gekoppelt.
- Der Sättigungszustand der Streuwege ist konstant.
- Die magnetische Feldstärke innerhalb der Läufernuten hat nur eine Komponente senkrecht zur Nutmittellinie [1].
- Die Kurzschlußringe sind stromverdrängungsfrei.

Bild 1 zeigt das Ersatzbild der betrachteten Anordnung mit den Koordinatensystemen. Bei der Ableitung der Systemgleichung wird der Zusammenhang zwischen Stab- und Ringströmen benötigt. Es gilt allgemein (Bild 2):

$$i_{2St\mu} = i_{2R(\mu+1)} - i_{2R\mu}. \tag{1}$$

Zur Verkürzung der Darstellung wird die Raumzeigerschreibweise benutzt. Bei der hier verwendeten Definition nach *Kovacs* [2] gilt z. B. für den Raumzeiger der Ständerströme

$$\vec{i}_1 = \frac{2}{3}\left(i_{1a} + \underline{a}\, i_{1b} + \underline{a}^2 i_{1c}\right) = i_{1\alpha} + j\, i_{1\beta} \quad \text{mit } \underline{a} = e^{j2\pi/3}. \tag{2}$$

Dr.-Ing. *Ulrich Beckert* und Dr.-Ing. *Wolfram Neuber* sind wissenschaftliche Mitarbeiter der Sektion Maschinen- und Energietechnik an der Bergakademie Freiberg.

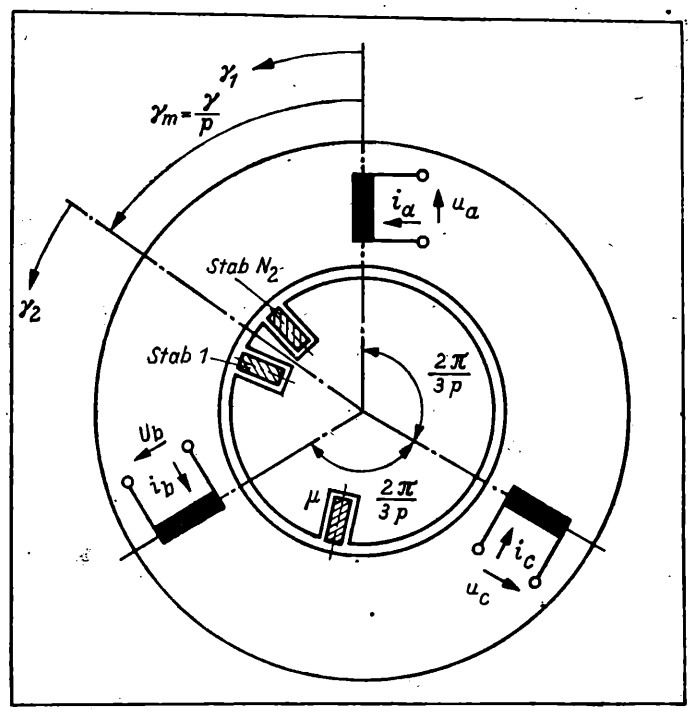


Bild 1. Ersatzbild von Ständer- und Läuferwicklung und Koordinatensysteme

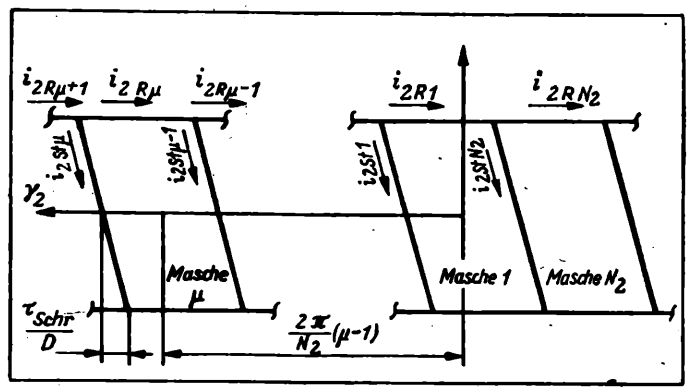


Bild 2. Abwicklung der Käfigwicklung

Analog dazu wird ein Raumzeiger der Läuferströme definiert

$$\vec{i}_2 = \frac{2}{N_2}\sum_{\mu=1}^{N_2} i_{2R\mu}\, e^{j\alpha(\mu-1)} \tag{3}$$

mit

$\alpha = p\, 2\pi/N_2$ elektrischer Nutwinkel (Bild 1)

$i_{2R\mu}$ Strom im μ-ten Ringsegment.

2. Systemgleichungen des stromverdrängungsfreien Käfigläufermotors

Das dynamische Verhalten des stromverdrängungsfreien Käfigläuferasynchronmotors wird durch folgendes Gleichungssystem beschrieben [3] [4]:

Die Spannungsgleichungen für Ständer (Index *1*) und Läufer (Index *2*) lauten

$$\frac{d\vec{\psi}_1}{dt} = -j\,\omega_k \vec{\psi}_1 + \vec{u}_1 - R_1 \vec{i}_1 \tag{4}$$

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = j\,(\omega - \omega_k)\,\vec{\psi}_2 - R_2 \vec{i}_2. \tag{5}$$

Für die Ständer- und Läuferflußverkettungen gilt

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_{12} \vec{i}_2 \tag{6}$$

$$\vec{\psi}_2 = L_{21} \vec{i}_1 + L_2 \vec{i}_2. \tag{7}$$

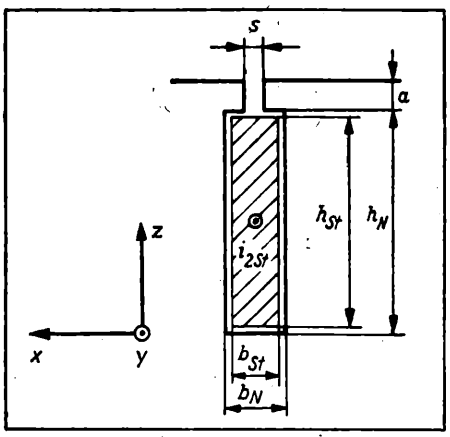


Bild 3
Geometrie des Läuferstabes mit Koordinatensystem zur Berechnung der Stromverdrängung

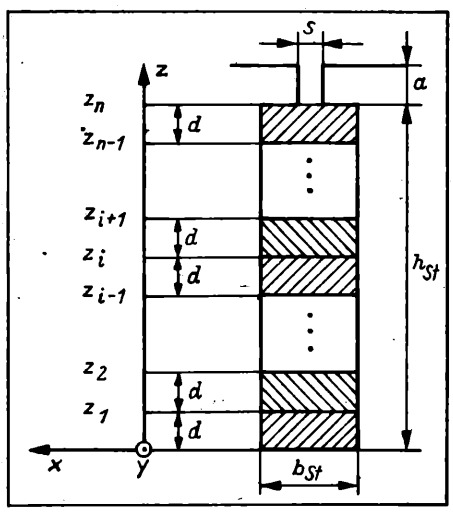


Bild 4
Unterteilung des rechteckigen Hochstabes in n äquidistante stromverdrängungsfreie Schichten

Für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment gilt

$$m = \frac{3}{2} p L_{12} \left[\vec{i}_1 \times \vec{i}_2\right] = -\frac{3}{2} p L_{12} Im \left[\vec{i}_1^* \vec{i}_2\right] \tag{8}$$

$$m = J \frac{\mathrm{d}\omega_m}{\mathrm{d}t} + m_w. \tag{9}$$

Die Bewegungsgleichung des Einmassendrehschwingers (9) ist gegebenenfalls durch die Bewegungsgleichungen eines Mehrmassendrehschwingers zu ersetzen.
In den Spannungsdifferentialgleichungen bedeuten ω die elektrische Winkelgeschwindigkeit des Läufers und ω_k die des frei wählbaren Bezugssystems. Die Bestimmungsgleichungen der Parameter können [5] entnommen werden.
Für den Raumzeiger der Läuferflußverkettungen gilt die Definition

$$\vec{\psi}_2 = \frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} \vec{\psi}_{2\mu} e^{j\alpha(\mu-1)} \tag{10}$$

$\psi_{2\mu}$ mit der μ-ten Masche des Läuferkäfigs (Bild 2) verketteter magnetischer Fluß.

Die Raumzeiger der Ständerspannungen $\vec{u}_1$ und der Ständerflußverkettungen $\vec{\psi}_1$ sind analog zu (2) definiert.

3. Berücksichtigung der Stromverdrängung

Unter der eingangs getroffenen Voraussetzung, daß die magnetische Feldstärke innerhalb der Läufernut nur eine Komponente senkrecht zur Nutmittellinie hat, läßt sich das Gleichungssystem des stromverdrängungsfreien Käfigläuferasynchronmotors (4) bis (9) auf relativ einfache Weise für den Asynchronmotor mit Stromverdrängungsläufer erweitern. Die zentrale Idee ist dabei, die partielle (parabolische) Differentialgleichung für die magnetische Feldstärke im Hochstab durch örtliche Diskretisierung in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen zu überführen. Dieses Differentialgleichungssystem ist über die Randbedingung für die magnetische Feldstärke an der Staboberkante und über die Nutstreuflußverkettung, die sich durch Integration der Feldstärkeverteilung über die Stabhöhe ergibt, mit den Spannungsdifferentialgleichungen und den Bewegungsdifferentialgleichungen gekoppelt.
Bild 3 zeigt den in das Läufereisen eingebetteten Hochstab. Es wird noch vorausgesetzt, daß der Rechteckleiter die Nut in ihrer gesamten Breite und Höhe füllt, d.h.

$$b_{St} \approx b_n \text{ und } h_{St} \approx h_n$$

und daß die Nut gegen ihre übrigen Abmessungen lang ist. Unter der Annahme eines reinen Nutquerfeldes, d.h. für

$$H = H_x(z,t) \qquad H_y = H_z = 0 \tag{11}$$

$$G = G_y(z,t) \qquad G_x = G_z = 0$$

beschreibt die partielle Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 H_{St}}{\partial z^2} - \varkappa \mu_0 \frac{\partial H_{St}}{\partial t} = 0 \tag{12}$$

mit den Randbedingungen

$$H_{St}(z=0) = 0 \tag{13}$$

und

$$H_{St}(z = h_{St}) = \frac{1}{b_{St}} i_{2St} \tag{14}$$

die örtliche und zeitliche Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke im Nutraum.
Da bei transienten Vorgängen von einem beliebigen zeitlichen Verlauf der Läuferströme auszugehen ist, läßt sich die Differentialgleichung (12) im allgemeinen nicht geschlossen lösen.
Im folgenden wird die partielle Differentialgleichung (12) durch örtliche Diskretisierung in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen überführt: Unterteilt man den homogenen Rechteckstab entsprechend Bild 4 in n äquidistante Schichten, wobei die Gitterlinien allgemein durch

$$z_i = i\,d \tag{15}$$

$$d = \frac{h_{St}}{n} \quad \text{Schichtdicke}$$

festgelegt sind, und setzt man voraus, daß die Stromdichte innerhalb einer Schicht konstant ist, so kann die partielle Differentialgleichung (12) durch das System gewöhnlicher Differentialgleichungen

$$\frac{\mathrm{d}H_{Sti}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\varkappa \mu_0} \frac{H_{St(i+1)} - 2H_{Sti} + H_{St(i-1)}}{d^2} \tag{16}$$

$$i = 1 \ldots (n-1)$$

H_{Sti} magnetische Feldstärke der Gitterlinie i

approximiert werden [6]. Die Randbedingungen lauten in Differenzenschreibweise:

$$H_{St0} = 0 \quad \text{und} \quad H_{Stn} = \frac{1}{b_{St}} i_{2St}. \tag{17}$$

Da nach Voraussetzung die Stromdichte innerhalb einer Schicht konstant sein sollte, ändert sich die magnetische Feldstärke im Bereich einer Schicht nur linear. Es gilt allgemein

$$H_{St}(z) = H_{Sti} + \frac{H_{St(i+1)} - H_{Sti}}{d}(z - z_i). \tag{18}$$

Damit erhält man für die um den Anteil des Streuschlitzes — der ja von der Stromverdrängung nicht beeinflußt wird — verminderte Nutstreuflußverkettung des Rechteckstabes mit Stromverdrängung

$$\psi_{\sigma n St} = \mu_0 l_i \int_0^{h_{St}} H_{St}(z) \frac{z}{h_{St}} \mathrm{d}z$$

$$\psi_{\sigma n St} = \mu_0 l_i \sum_{i=0}^{n-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left[H_{Sti} + \frac{H_{St(i+1)} - H_{Sti}}{d}(z - z_i)\right] \frac{z}{h_{St}} \mathrm{d}z$$

$$\psi_{\sigma n St} = l_{\sigma n0} \sum_{i=1}^{n} a_i b_{St} H_{Sti}, \tag{19}$$

wobei

$$l_{\sigma n0} = \mu_0 l_i \frac{h_{St}}{3 b_{St}} \tag{20}$$

die um den Anteil des Streuschlitzes verminderte Nutstreuinduktivität des stromverdrängungsfreien Rechteckstabes ist. Für die Koeffizienten gilt:

$$a_i = \frac{3i}{n^2} \qquad i = 1 \cdots (n-1)$$
$$a_n = \frac{3n-1}{2n^2}. \tag{21}$$

Für die Nutstreuflußverkettung der μ-ten Masche (Bild 2) der Käfigwicklung gilt dann:

$$\psi_{\sigma n \mu} = \psi_{\sigma n St(\mu-1)} - \psi_{\sigma n St \mu} = l_{\sigma n 0} \sum_{i=1}^{n} a_i b_{St} (H_{Sti,(\mu-1)} - H_{Sti,\mu}). \tag{22}$$

Die Annahme eines konstanten Sättigungszustandes erlaubt es, das Nutquerfeld des μ-ten Stabes entsprechend (1) als Überlagerung eines vom Ringstrom $i_{2R(\mu+1)}$ und eines vom Ringstrom $i_{2R\mu}$ erzeugten Feldes aufzufassen:

$$H_{St\mu} = H_{R(\mu+1)} - H_{R\mu}.$$

Eliminiert man in (22) die von den Stabströmen erzeugten magnetischen Felder durch die von den Ringströmen erzeugten, faßt die Nutstreuflußverkettungen der N_2 Läufermaschen analog (10) zu einem Raumzeiger der Nutstreuflußverkettungen zusammen und definiert entsprechend (2) einen Raumzeiger der Nutquerfelder

$$\vec{H}_i = \frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} H_{Ri,\mu} e^{j\alpha(\mu-1)}, \tag{23}$$

so erhält man unter Berücksichtigung von

$$\frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} [-H_{Ri,(\mu-1)} + 2H_{Ri,\mu} - H_{Ri,(\mu+1)}] e^{j\alpha(\mu-1)}$$
$$= [-e^{-j\alpha} + 2 - e^{j\alpha}] \vec{H}_i = \left[2 \sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 \vec{H}_i \tag{24}$$

für den Raumzeiger der Nutstreuflußverkettungen:

$$\vec{\psi}_{\sigma n 0} = L_{\sigma n 0} \sum_{i=1}^{n} a_i b_{St} \vec{H}_i, \quad \text{wobei} \tag{25}$$

$$L_{\sigma n 0} = \left[2 \sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 l_{\sigma n 0} \tag{26}$$

ist.

Werden nach dem gleichen Verfahren die N_2 Differentialgleichungssysteme für die Feldstärkeverteilungen in den Rechteckstäben (16) zusammengefaßt, so ergibt sich

$$\frac{d\vec{H}_i}{dt} = \frac{1}{\varkappa \mu_0} \frac{\vec{H}_{i+1} - 2\vec{H}_i + \vec{H}_{i-1}}{d^2} \tag{27}$$
$$i = 1 \cdots (n-1)$$

mit den Randbedingungen

$$\vec{H}_0 = 0 \quad \text{und} \quad \vec{H}_n = \frac{1}{b_{St}} \vec{i}_2. \tag{28}$$

4. Systemgleichungen des Asynchronmotors mit Hochstabläufer

Die Ständer- und Läuferspannungsdifferentialgleichungen, die Beziehungen für die Flußverkettungen, das Differentialgleichungssystem der magnetischen Feldstärke im Rechteckstab, die Randbedingung für die magnetische Feldstärke an der Staboberkante, die Beziehung für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment und die Bewegungsgleichung(en) des mechanischen Systems

$$\frac{d\vec{\psi}_1}{dt} = -j\omega_k \vec{\psi}_1 + \vec{u}_1 - R_1 \vec{i}_1$$

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = j(\omega - \omega_k) \vec{\psi}_2 - R_2 \vec{i}_2$$

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_{12} \vec{i}_2$$

$$\vec{\psi}_2 = L_{21} \vec{i}_1 + L_2 \vec{i}_2 + \vec{\psi}_{\sigma n 0}$$

$$\vec{\psi}_{\sigma n 0} = L_{\sigma n 0} \sum_{i=1}^{n} a_i b_{St} \vec{H}_i$$

$\psi_{\sigma n 0}$ die um den von der Stromverdrängung unabhängigen Anteil des Streuschlitzes verminderte Nutstreuung

$$\frac{d\vec{H}_i}{dt} = \frac{1}{\varkappa \mu_0} \frac{\vec{H}_{i+1} - 2\vec{H}_i + \vec{H}_{i-1}}{d^2}$$
$$i = 1 \cdots (n-1)$$
$$\vec{H}_n = \frac{1}{b_{St}} \vec{i}_2 \tag{29}$$

$$m = -\frac{3}{2} p L_{12} Im [\vec{i}_1^* \vec{i}_2]$$

$$m = J \frac{d\omega_m}{dt} + m_w$$

beschreiben in ihrer Gesamtheit das dynamische Verhalten des Asynchronmotors mit Stromverdrängungsläufer. In der Läuferinduktivität L_2 ist nun im Gegensatz zum stromverdrängungsfreien Käfigläuferasynchronmotor der Anteil der Nutstreuung, die ja gesondert berechnet wird, nicht mehr enthalten. Es gilt:

$$L_2 = L_{h2}(1 + \sigma_{dv2}) + L_{\sigma zk} + L_{\sigma R} + L_{\sigma ns}. \tag{30}$$

Wegen der enthaltenen Nichtlinearitäten kann das Differentialgleichungssystem des Asynchronmotors mit Stromverdrängungsläufer im allgemeinen nur numerisch gelöst werden.

5. Zusammenfassung

Es wird das den dynamischen Betrieb des stromverdrängungsfreien Käfigläuferasynchronmotors beschreibende Differentialgleichungssystem für den Asynchronmotor mit Stromverdrängungsläufer erweitert. Die Stromverdrängungserscheinung im Läufer wird durch eine schichtweise konstante Stromdichteverteilung in den Läuferstäben angenähert und die partielle Wirbelstromdifferentialgleichung in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen überführt.

Literatur

[1] *Bahr, R.:* Die Theorie der Stromverdrängung in einer Maschinennut von rechteckigem Querschnitt. Dissertation, TH Darmstadt 1964
[2] *Kovacs, K. P.; Racz, I.:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommschinen. Budapest: Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften 1959
[3] *Lorenzen, H. W.:* Zur Theorie des transienten Betriebsverhaltens von Drehstromkäfigankermotoren. Archiv für Elektrotechnik 53 (1969) 1, S. 13—30
[4] *Bausch, H.; Jordan, H.; Weis, M.:* Digitale Berechnung des transienten Verhaltens von stromverdrängungsfreien Drehstrom-Käfigläufermotoren. ETZ-A 89 (1968) 15, S. 361—366
[5] *Beckert, U.; Neuber, W.:* Digitale Simulation des dynamischen Verhaltens von Antrieben mit Doppel-Käfigläuferasynchronmotoren. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 11, S. 573—578
[6] *Beckert, U.:* Ein numerisches Verfahren zur Berechnung zweidimensionaler Wirbelstromprobleme. Zeitschrift elektr. Inform.- u. Energietechnik 10 (1980) 1, S. 1—21

EA 5684

Не забудте заблаговременно продлить подписку на журнал

ELEKTRIE

на 1987 год,

чтобы исключить перебои в получении всех номеров журнала в течение всего года.

Мы рады, что вы и дальше будете регулярными читателями нашей публикации.

Elektroenergieübertragungstechnik bis zur Entscheidung für Drehstrom und ein nachträgliches Entscheidungsmodell[1)]

E. Muschick, KDT, Zittau

Die grundlegenden Entdeckungen und ersten Entscheidungen der Jahre 1729 bis 1883 führen nun in der Zeit bis etwa 1905 zu einer stürmischen Entwicklung der Übertragungstechnik. Es waren eine große Zahl von Entscheidungen innerhalb des Fachgebietes und auch in verwandten Disziplinen zu fällen. Einige erreichten historische Dimensionen. Tafel 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Ereignisse jener Jahre.

Tafel 1. Zeittafel der Ereignisse

1884 • Erste 2000-V-Wechselstromfreileitung der Welt in Italien (Lanzo-Turin) in Betrieb; 40 km, 20 kW, $\eta = 0{,}89$. In der Empfangsstation wurde der Wechselstrom in Gleichstrom umgeformt.
• Blockstation in Berlin Ecke Friedrichstraße — Unter den Linden errichtet; 100 kW, 100 V Gleichspannung

1885 • Erstes deutsches öffentliches Elektrizitätswerk (Lichtwerk) geht am 15. August in Betrieb; Berlin, Markgrafenstr. 44, 100 V Gleichspannung, 6 Dampfmaschinen je 111 kW (150 PS) und 12 Gleichstromgeneratoren, Zweileitersystem.
Von 540 kW nehmen das Schauspielhaus 150 kW und die Reichsbank 20 kW ab.
• *Déri, Bláthy* und *Zipernovski* entwickeln einen technisch brauchbaren Transformator

1886 • Von einer Gemeinde (Lübeck) errichtetes Elektrizitätswerk
• Stadtwerk mit Akkumulatorenbetrieb in Dessau errichtet
• Dreileitersystem beim Elektrizitätswerk der Stadt Elbersfeld in Betrieb genommen

1887 • Zusammenschaltung der, von den Kraftwerken (Lichtwerken) Markgrafenstraße und Mauerstraße gespeisten Netze
• *Haselwander* entwickelt dreiphasigen Synchrongenerator mit verketteten Phasen; 100 V, 960 min^{-1}, 32 Hz, Beleuchtung einer Hutfabrik
• *Tesla* meldet in den USA Patente auf ein „System der Kraftübertragung mit Elektrizität" an — Mehrphasensystem

1889 • *v. Dolivo-Dobrovolski* entwickelt einen brauchbaren Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer; Nebenschluß-Charakteristik
• *v. Dolivo-Dobrovolski* baut einen Drehstrom-Transformator.
• Ganz und Co. beginnen mit dem Bau von Einphasen-Kommutatormotoren

1890 • Erstes deutsches Wechselstromkraftwerk geht am 1. Mai in Betrieb
• *Brown* unternimmt Versuche für eine Drehstrom-Kraftübertragung von 30 kV
• Umformung von Wechselstrom 2 kV in Gleichstrom in Kassel

1891 • *Ferranti* nimmt am 16. Februar das erste Wechselstrom-Großkraftwerk der Welt (Deptford bei London) in Betrieb. Erstmalig außerhalb des Verbraucherschwerpunktes errichtet" Einsatz eines 10-kV-Kabels papierisoliert, konzentrische Anordnung
• *O. v. Miller* und *v. Dolivo-Dobrovolski* nehmen am 24. August die erste 15-kV-Drehstromfreileitung von Lauffen nach Frankfurt aus Anlaß der internationalen Frankfurter elektrotechnischen Ausstellung in Betrieb;
100 kW, 175 km, 12,5 mm^2 Cu, 40 Hz, $\eta = 0{,}75$, Leiterabstand 1 m, Holzmaste etwa 8 m, mittlere Spannweite 60 m
• Drehstrom-Kraftwerk in Lauffen für die Übertragung Lauffen-Frankfurt am Main
• Drehstrommotor 74,4 kW (100 PS) von *v. Dolivo-Dobrovolski* für die Ausstellung in Frankreich gebaut
• *Goerges* erfindet den Drehstromkommutatormotor

1892 • *Schmidt* wendet Heißdampf im Maschinenbetrieb an

1893 • Erstes Pumpspeicherwerk der Welt in Klus (Schweiz) errichtet

1894 • *Kolben* untersucht den Frequenzbereich von 10 bis 140 Hz und benennt Frequenzen von 50 bis 60 Hz für die Elektroenergieversorg ung als optimal

1895 • *Ferranti* meldet den ersten Ölschalter zum Patent an

1900 • Erste Dampfturbine in der Welt (1000 kW Parsonturbine von BBC) für Energieversorgungszwecke im Kraftwerk Elbersfeld in Betrieb genommen

1904 • *Merz* und *Price* melden ein englisches Patent auf eine „Sicherheitsabschaltung für Wechselstromsysteme" (Differentialschutzsystem) an. Sie wird 1906/07 in einem 20-kV-Kabelnetz in Nordengland in größerem Umfange angewandt
• Erste europäische 40-kV-Freileitung in Italien (Nembro-Gromo) errichtet; 35 km, 32 mm^2 Cu, Holzmaste 8 m

1905 • Inbetriebnahme der ersten europäischen 50-kV-Freileitung von Miesbach nach München; 53 km, 42 mm^2 Cu, zwei Systeme auf zwei vollständig getrennten Traversen
• Erste Freiluftanlage in Amerika errichtet. Zunächst nur Überspannungsschutzeinrichtungen mit zugehörigen Trennern und die Sammelschienen im Freien, Ölschalter und Transformatoren in Gebäuden

Prof. Dr. sc. techn. *Edwin Muschick*, Ingenieurhochschule Zittau, Sektion Elektroenergieversorgung.

[1)] Nach einem Vortrag zum X. KDT-Kolloquium des KVE am 10. 4. 86

1. Vorfeld einer großen Entscheidung

Die Zeittafel läßt erkennen, welche Vielfalt technischer Entscheidungen während des betrachteten Zeitraumes aufgetreten ist. Es ist nicht mehr möglich, sie alle heute noch genau zu analysieren. Von der Wahl der Versorgungsvarianten Gleichstrom, Wechselstrom, Drehstrom läßt sich hingegen einiges rekonstruieren.
1885 lag der Transformator in technisch brauchbarer Form vor. Mit *Bradlays* Patenten vom 20. Oktober 1888 waren der dreiphasige Synchrongenerator, der dreiphasige Synchronmotor und der Induktionsmotor mit Kurzschlußläufer verfügbar. Das technische Entscheidungsproblem wäre mithin bereits 1890 zugunsten des Drehstromes lösbar gewesen. Die Entscheidung zur Stromart bot sich den Zeitgenossen freilich nicht als reines technisches Problem dar. Unternehmen, die auf den zeitlich früher verfügbaren Gleichstrom festgelegt waren, scheuten den Aufwand für eine Umstellung und hatten damit ein Motiv, die Neuerung abzulehnen.
v. Dolivo-Dobrovolski schreibt hierzu in [1]:

„Allmählich spitzte sich der Wettstreit zu und verlor viel von seiner Sachlichkeit. Viele Firmen wollten nicht gleichzeitig beide Systeme führen: eines sollte das allein seligmachende sein. Was wurde nicht seiner Zeit alles dem Wechselstrom als Fehler zugeschrieben ... Die Erregtheit der elektrotechnischen Welt um die geschilderte Zeit von 1885 bis 1890 übersteigt manches auf technischem Gebiet Gewesene."

Sachliche und pragmatische Erwägungen ließen sich schwer auseinanderhalten. *v. Dolivo-Dobrovolski* schreibt im bereits zitierten Aufsatz z. B., daß er einen Gegenvortrag aus Rücksicht auf Interessen einer befreundeten Firma unterlassen hat. Solche Rücksichten mögen sich noch in vielfältiger Weise geäußert haben. Selbst jene Fachleute, die sich nicht durch wirtschaftliche Interessen polarisiert sahen, äußerten sich befangen.
Voigt schreibt in [2]:

„Wohl die gesamte Fachwelt Deutschlands ..., sie stand aber derart im Banne des Gleichstroms, daß sie in heute für uns unübertrefflicher Gleichgültigkeit diesem neuen Stromsystem wenig Beachtung schenkte, es vielfach sogar übersah."

Später noch wurde die Wechselstromtechnik als vorübergehender Rummel aufgefaßt. *Voigt* ist einer der wenigen, die ihren Irrtum öffentlich bekennen und der Ursache nachgehen [2]:

„Geschäftlich konnte es mir ja ganz gleichgültig sein, ob die von uns gebauten Apparate und Sicherungen in Gleich- oder Wechselstromnetzen installiert wurden, im Gegenteil, jede Ausbreitung des elektrischen Lichtes durch irgendwelche Stromquellen konnte uns nur angenehm sein; nur Wechselstrom durfte es nicht sein, der war und blieb außer Betracht, denn er war einfach unmöglich. So tief steckte auch ich im Banne der falschen Vorstellung, daß ich gar nicht überlegte, sondern blind darauflos behauptete und mir noch wer weiß was zugute tat, daß ich daran mitarbeitete, Frankfurt vor einem nie wieder gutzumachenden Fehler zu bewahren."

Die Stadt Frankfurt a. M. entschied sich dafür, die verschiedenen Systeme in einer Ausstellung zu vergleichen, um sachlich wählen zu können. So entstand der Plan der historischen Frankfurter Ausstellung von 1891. Am 24. August 1891 nahmen *O. v. Miller* und *v. Dolivo-Dobrovolski* auf dieser Ausstellung die erste Drehstromübertragung von Lauffen nach Frankfurt in Betrieb und feierten damit einen großen Triumph.
Die Entscheidung der Stadt Frankfurt fiel jedoch nicht dementsprechend aus. Es wurde eine Wechselstromübertragung von 45,3 Hz mit Umformung auf Gleichstrom gewählt. Diese Variante ist aus heutiger Sicht nicht optimal und bereitete der Stadt später viele

Tafel 1. Zahl der Elektrizitätswerke für die öffentliche Versorgung über der Stromart nach *Schäfer* (ETZ 87 (1966) 4)

Jahr	Gleichstrom mit Akkumulatoren	Gleichstrom ohne Akkumulatoren	Wechselstrom	Drehstrom
1. April 1885	80	40	18	10
1. Okt. 1885	109	37	18	16
1. März 1897	168	41	29	27
1. März 1898	270	33	34	38
1. März 1899	361	33	38	57
1. März 1900	489	36	48	79
1. April 1901	600	24	54	90
1. April 1902	684	25	57	104
1. April 1903	738	28	57	116

Schwierigkeiten. Man kann heute die Gründe, die zu dieser Entscheidung führten, nicht restlos aufklären.
Zweierlei hatte jedoch dabei besonderes Gewicht.

1. Die technischen Eigenschaften der Entscheidungsvarianten konnten noch nicht vollständig bewertet werden. Das Gewicht einzelner Eigenschaften war ungewiß.
2. Die Bedarfsentwicklung der Zukunft war ungewiß.

Tafel 1 aus [3] zeigt die Entwicklung der Stromarten in den Anfangsjahren. Die Speicherfähigkeit des Gleichstroms wurde von den Zeitgenossen offenbar hoch bewertet. Hinzu kam die bessere Eignung des Gleichstroms für Bahnantrieb wegen der Hauptstromcharakteristik der Motoren, die bessere Lichtausbeute bei Bogenlampen und die direkte Anwendbarkeit des Gleichstroms in vielen Prozessen, besonders in der Elektrochemie. Diese Vorteile waren bekannt. Dazu nannte man Nachteile des Wechselstroms, deren Bewertung mehr oder weniger ungewiß war. Es wurden

— Leerlaufverluste
— Geräusche
— Synchronisationsprobleme
— Induktion in benachbarten Leitungen
— geringere Haltbarkeit der Lampen
— die Gefahr des Übertritts der Hochspannung auf die Niederspannungsseite der Transformatoren

ins Feld geführt. Viele von den Nachteilen des Wechselstroms waren richtig dargestellt, aber zu stark gewichtet.
Das Urteil der Fachwelt half da zunächst nicht recht weiter. Gegen den Wechsel- oder Drehstrom waren nahezu alle Fachleute jener Zeit. Für Wechselstrom oder Drehstrom aber solche hervorragenden Männer wie z. B. *v. Helmholtz, O. v. Miller, Brown, Rathenau, v. Dolivo-Dobrovolski, Déri, Tesla.*
Sich auf Autoritäten zu stützen, half auch nicht, weil sich im entgegengesetzten Lager ebenfalls genügend davon fanden. Selbst *Edison* und *Siemens* teilten die Meinung der Gleichstromverfechter. *Edisons* Ausspruch im Jahre 1889 als man ihn zur Besichtigung eines Drehstrommotors bat:

„Nein, nein, Wechselstrom ist ein Unding, hat keine Zukunft, ich will nichts vom Wechselstrom wissen, noch sehen"

belegt, wie befangen auch hervorragende Techniker sein können und wie schwer es ist, sicheres Wissen von Ungewißheiten zu trennen.
Bei der Bedarfsentwicklung kann man vereinfacht zwei Möglichkeiten ansetzen, die eben seinerzeit nicht gewiß waren:

1. Der Bedarf wird so schwach ansteigen (F_1), daß es nicht nötig ist, größere Energiemengen über weite Strecken heranzuholen.
2. Der Bedarf wird so stark ansteigen (F_2), daß dies eine Übertragung zur Folge hat.

2. Nachträgliches Spiel zur Formalisierung

Nimmt man zunächst an, es sei lediglich zwischen den Alternativen Gleichstrom E_1 und Wechselstrom E_2 zu wählen, dann müßte wohl der Effekt e, den eine solche Wahl jeweils zur Folge hat, die Entscheidung bestimmen. Damit läßt sich die Matrix

	F_1	F_2
E_1	e_{11}	e_{12}
E_2	e_{21}	e_{22}

(1)

E_1 Gleichstrom
E_2 Wechselstrom
F_1 schwacher Anstieg des Bedarfs
F_2 starker Anstieg des Bedarfs
e_{ij} Effekte bei den jeweiligen Kombinationen E_i, F_j

aufschreiben. Den ungewissen Entwicklungsmöglichkeiten F_1 und F_2 wird man aber aus damaliger Sicht gern Wahrscheinlichkeiten zugeordnet haben, die ja den persönlichen Entschluß maßgeblich beeinflußten.
Wird angenommen, daß q_1 die Wahrscheinlichkeit für F_1 und analog q_2 die Wahrscheinlichkeit für F_2 ist, dann ist es für den Entschluß sehr wesentlich, wie die Verteilung $Q\,(q_1, q_2)$ bestimmt wird. Diese war aber zu jener Zeit nicht minder ungewiß als die Entwicklungsmöglichkeiten F_1 und F_2. Bei emotionsloser Betrachtung müßte ein Fachmann auch aus damaliger Sicht zu folgenden zwei Aussagen bereit gewesen sein:

① q_1 ist nicht kleiner als q_2

② $e_{11} < e_{12}$; $e_{12} < e_{22}$; $e_{21} < e_{22}$; $e_{11} > e_{21}$.

Damit kann folgende Formalisierung vorgenommen werden:

$$q_1 - q_2 \geqq 0; \quad q_1 \geqq 0, q_1 \geqq 0; \quad q_1 + q_2 = 1. \tag{2}$$

Das Ungleichungssystem (2) erfüllen alle Verteilungen, die zwischen folgenden Extremalverteilungen liegen:

$$Q_1 : q_1 = 0; q_2 = 1; \quad Q_2 : q_1 = \frac{1}{2} : q_2 = \frac{1}{2},$$

woraus eine Extremalwertematrix

$$M_E = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \tag{3}$$

folgt. Daraus erhält man mit Gl. (1):

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{12} & \frac{e_{11}+e_{12}}{2} \\ e_{22} & \frac{e_{21}+e_{22}}{2} \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Wollte man nun recht vorsichtig sein und nach dem ungünstigsten Fall $\min\limits_{j} e_{ij}$ wählen, also die optimale Alternative E_0 nach

$$E_0 = \left\{E_i / \max_i \min_j e_{ij}\right\} \tag{5}$$

bestimmen, folgt aus (4) und (5) unter Berücksichtigung von Aussage ②:

$$E_1: \; e_{12} \quad \frac{e_{11}+e_{12}}{2} \quad \frac{e_{11}+e_{12}}{2} \quad \max_i \min_j e_{ij}$$

$$E_2: \; e_{22} \quad \frac{e_{21}+e_{22}}{2} \quad \frac{e_{21}+e_{22}}{2} \quad \frac{e_{21}+e_{22}}{2};$$

also $E_0 = E_2$. Der Wechselstrom ist optimal.
Eine weniger vorsichtige Entscheidung nach

$$E_0 = \left\{E_i / \max_i \sum_{j=1}^{n} e_{ij}\right\} \quad \text{führt nach (4) und (6) zu} \tag{6}$$

$\max\limits_i \sum\limits_j e_{ij} = e_{22} + \frac{e_{21}+e_{22}}{2}$ und mithin ebenfalls zu $E_0 = E_2$.

Man kann sich durch Annahme quantitativer Differenzen der Effekte einen Überblick darüber verschaffen, welchen Einfluß die Vorsicht in den beiden Gleichungen (5) und (6) hat.

Mit $e_{21} + \varepsilon_1 = e_{11}$; $e_{11} + \varepsilon_2 = e_{12}$; $e_{12} + \varepsilon_3 = e_{22}$

gelten nach (5) als Bedingungen

$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 > 0$; $\varepsilon_2 > 0$ und $\varepsilon_3 > \varepsilon_1$, während nach (6) lediglich

$\varepsilon_3 > \frac{\varepsilon_1}{3}$

gefordert wird.
Obwohl die vorsichtige und auch die mittelwertorientierte Entscheidung zum gleichen Ergebnis führen, muß vermerkt werden, daß sie beide nicht risikofrei sind, weil vor der Operation nach Gl. (4) bereits ein Mittelwert gebildet wurde. Auf das entscheidungstheoretische Konzept sei hier jedoch nicht eingegangen, um den Aufsatz nicht mit weiteren Formalisierungen zu belasten.
Immerhin bleibt es bemerkenswert, daß bereits mit den außerordentlich zurückhaltenden Aussagen ① und ② eine deutliche Asymmetrie zugunsten des Wechselstroms nachweisbar ist.
Natürlicht reicht diese vereinfachte und nachträgliche Rechnung nicht aus, um die richtige Entscheidung restlos zu begründen, weil beispielsweise die Ungewißheiten der Eigenschaften und andere Einflüsse nicht erfaßt sind, aber zugleich ist erkennbar, daß eine modellierte Entscheidung eher auf das Optimum führt als eine empirische und daß es einen Zeitpunkt gegeben hat, zu dem eine modellierte Entscheidung eine optimale Lösung hinreichend begründen konnte, zumal die Effekte damals wesentlich genauer bestimmbar waren als dies jetzt im Nachgang möglich ist.

3. Empirische und modellierte Entscheidung

Das damalige Chemnitz führte bereits 1894 den Drehstrom ein, obwohl *Edison* sich noch 1889 gegen Wechselstrom äußerte, während sich Leipzig 1895 für den Gleichstrom entschied. Solche Entschlüsse sind in gewissen Grenzen irreversibel. Selbst wenn später erkannt wird, den falschen Weg gewählt zu haben, ist eine Erweiterung — z. B. in Leipzig mit Gleichstrom — billiger als eine Umstellung. Deshalb konnte die Stadt Leipzig erst in den 50er und 60er Jahren dieses Jahrhunderts und mit sehr großen Aufwänden wieder auf Wechselstrom umgestellt werden.

Dabei war die Leipziger Entscheidung aus der Sicht jenes Zeitpunktes wohlerwogen. *H. Koettnitz* berichtet:

„Man wollte eine hohe Zuverlässigkeit der innerstädtischen Messehallen- und Beleuchtungsversorgung (einschließlich Hauptbahnhof — damals noch nicht der uns bekannte, große Bau) während der Frühjahrs- und Herbstmessen garantiert haben. Dazu wurde eine große, leistungsfähige Batterieanlage unterirdisch unter dem damaligen Königsplatz installiert mit Schnellumschaltung bei Störungen im Kraftwerk (Gleichstrom). Diese Batterie war in der Lage, die gesamte Innenstadt 3 Stunden uneingeschränkt zu versorgen. Umformer waren für eine Schnellumschaltung nicht geeignet, Gleichrichter/Wechselrichter zum Zeitpunkt der Entscheidung technisch noch unvollkommen und unzuverlässig. Damit war für Leipzig die Entscheidung Gleichstrom beinahe zwingend. Im übrigen ist diese Batterie bis in die 50er Jahre in Betrieb gewesen."

Es ist nicht nachzuweisen, daß der Chemnitzer Entschluß zu jener Zeit besser begründet war als der Leipziger. Man wird mehr Mut und die glücklichere Hand gehabt haben, aber in späteren Entscheidungen durfte man das Optimum erwarten. Tafel 2 zeigt, daß dies nicht so rasch erreichbar war. Es gilt wohl für eine Entscheidung, daß sie umso näher an das Optimum heranführen kann, je weniger Emotion und Befangenheit sie beeinflussen. Dies ist schon weitgehend erreichbar, wenn das Problem für eine quantitative Entscheidung *aufbereitet* wird.

Mit dem Bürocomputer-Dialogprogramm VERENA [8] ist es möglich, hierfür bereits nichtquantitative Bewertungen zu verarbeiten. Damit wurde die Frankfurter Entscheidung unter Bezug auf Abschnitt 2. und mithin aus der Sicht der Bedarfsungewißheit berechnet.

Es lagen der Stadt um 1891 folgende Projekte und damit Entscheidungsvarianten vor:

E_1: Versorgung mit Gleichstrom
E_2: Übertragung mit Wechselstrom.
Dieser wird im Stadtgebiet in Gleichstrom umgeformt. Stadtnetz Gleichstrom
E_3: Übertragung und Verteilung im Stadtnetz mit Wechselstrom
E_4: Übertragung und Verteilung im Stadtnetz mit Drehstrom

Folgende mögliche Entwicklungsvarianten seien lediglich zu betrachten:

Der Anstieg sei für
F_1: Kraftstrom schwach, Lichtstrom schwach
F_2: Kraftstrom schwach, Lichtstrom stark
F_3: Kraftstrom stark, Lichtstrom schwach
F_4: Kraftstrom stark, Lichtstrom stark.

Zu den Kombinationen E_i, F_j seien wieder Effekte e_{ij} analog Gl. (1) gegeben, zu denen lediglich folgende Aussagen möglich wären:

$$e_{i1} < e_{i2} < e_{i3} < e_{i4}; \quad e_{11} > e_{21} > e_{31} > e_{41}; \quad e_{14} < e_{24} < e_{34} < e_{44}.$$

Die Auswertung des Entscheidungsproblems mit dem Programm VERENA ist bei diesem geringen Informationsangebot nur nach dem Minimax-Kriterium Gl. (5) möglich. Als optimal ergibt sich

$$E_0 = E_1,$$

also die Versorgung der Stadt mit Gleichstrom. Die Analyse ergibt gleichzeitig, daß die Berücksichtigung von F_1 — also des möglicherweise schwachen Anstieges des Bedarfes — dieses Ergebnis allein erzwingt. Verzichtet man darauf, die Möglichkeit F_1 zu berücksichtigen, so wird die Handlungsalternative E_2 optimal. Diese Lösung erweist sich als stabil, solange nicht von einem sicheren starken Anstieg des Bedarfes (alleinige Berücksichtigung von F_4) ausgegangen wird. Erst wenn dieser starke Bedarfsanstieg als gewiß angenommen wird, erscheint E_4 (Drehstrom) als optimale Lösung. Die Variante E_3 wird in keinem Fall optimal. Demnach war der Frankfurter Entschluß für E_2-Wechselstrom/Gleichstrom unter der Bedingung richtig, daß man die Entwicklungsmöglichkeit F_1 — schwacher Anstieg des Bedarfs an Licht und Kraftstrom, der eine Übertragung gänzlich unnötig macht — ausschließen kann. E_4 Drehstrom wäre nur zu wählen, wenn man gewiß ist, daß ein sehr starker Bedarfsanstieg eintreten wird und alle anderen Möglichkeiten ausgeschlossen werden können. Die erste Annahme kann nahezu als gesetzt gelten. Deshalb wurde ja die erwähnte Ausstellung veranstaltet. Die letzte Annahme wird damals kaum jemand bereit gewesen sein zu bestätigen, obwohl sie sich schließlich realisiert hat.

Das Rechenergebnis muß eingeschränkt werden. Es berücksichtigt zunächst keine technischen Bedingungen. Diese Darstellung mit einem Abstand von 95 Jahren mußte zwangsläufig idealisiert werden. Beispielsweise ist durchaus eine Gleichstromvariante mit einer Hochspannungsübertragung denkbar, bei der die hohe Spannung mit Maschinen umgeformt werden sollte. Sie schied aus, weil Kollektoren an Hochspannungsmotoren unerwünscht waren.

Wenn man jedoch bedenkt, daß Wechselstrom für die Übertragung gewählt wurde und der Drehstrom auf der Ausstellung so erfolgreich war, wird wohl doch die Haltung zur künftigen Entwicklung einen starken Einfluß auf den Entschluß genommen haben.

Weiterhin sind die Wahrscheinlichkeiten der Entwicklungsvarianten F_1 bis F_4 unberücksichtigt geblieben. Das Programm VERENA vermag dies *noch* nicht. Es wird daran gearbeitet, auch Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen, selbst wenn diese lediglich in Form von Relationen verfügbar sind.

Schließlich ist die Wahl nach Gl. (5) vielleicht zu vorsichtig, aber nötig, weil quantitative Aussagen zu Projektkosten und wirtschaftlichen Effekten, die damals beschaffbar oder wenigstens schätzbar waren, jetzt fehlen.

Quantitative Wertungen würden einen besser angepaßten Algorithmus erlauben. Dieser führt näher an die aus heutiger Sicht optimale Entscheidung, wenn mehr Informationen erfaßt und exakter verarbeitet werden.

Je systematischer eine Analyse der grundlegenden Elemente eines Entscheidungsproblems ist, umso zwingender wird dessen exakte Formulierung. Je genauer die Formulierung, umso besser ist die Einsicht in das Problem, das Erkennen der Notwendigkeit und Möglichkeit, Daten zu beschaffen, das Erkennen der Zusammenhänge, das Erkennen der offenstehenden Möglichkeiten und der möglichen Entscheidungsausgänge. Dies gibt größere Sicherheit bei Entscheidungen.

Aus Zeitgründen ist es häufig nicht möglich, eine Entscheidung vollständig zu modellieren. Es hilft aber schon, wenn darauf geachtet wird, daß alle Varianten (Alternativen) vollständig übersehen werden können. Dies erscheint elementar, ist es aber nicht immer. Aus der Entwicklung der Übertragungstechnik ist dies gut zu erkennen. Ebenso müssen alle Entscheidungsvarianten zulässig, d.h. unter allen Umständen realisierbar sein. Dem Entscheidenden muß sein Informationsstand bewußt werden.

Was ist gewiß, was ungewiß und in welchem Grade? Schließlich sollen alle möglichen Entscheidungsausgänge bei allen möglichen Varianten wenigstens verbal bewertbar sein und eine eindeutige Ordnung erlauben. Wenn es nun noch gelungen ist, das Problem vollständig zu erfassen und sich nicht auf ein Teilproblem ablenken zu lassen, ist schon viel für eine optimale Entscheidung getan.

4. Verzeichnis der Namen der Abschnitte 1. bis 3.

Bradlay, Albert James (1899) Physiker, London;
von Dolivo-Dobrovolski, Michail Ossipovitsch; (21.12.1861 (2.1.1862) bis 15.11.1919) Ingenieur, Berlin;
Voigt, Heinrich (1857 —) Ingenieur, Kassel;
von Miller, Oskar (7.5.1855 bis 9.4.1943) Ingenieur, München;
von Helmholtz, Hermann (31.8.1821 bis 8.9.1894); Physiker, Physiologe, Berlin;
Rathenau, Emil(1838 bis 1915) Industrieller, Berlin;
Brown, Charles (30.6.1827 bis 6.10.1905) Ingenieur, Winterthur Schweiz;
Déri, Miksche (27.10.1854 bis 3.3.1938) Ingenieur;
Tesla, Nicola (10.7.1857 bis 7.1.1943) Physiker, New York;
Edison, Thomas Alva (11.2.1847 bis 18.10.1931) Ingenieur, New York;
Koettnitz, Harald (5.11.1919) Ingenieur, TU Dresden

Literatur

[1] *Dolivo-Dobrovolski, M.:* Aus der Geschichte des Drehstroms. ETZ 38 (1917) 26, S. 341—344
[2] *Voigt, H.:* Nachdenkliches und Heiteres aus den ersten Jahrzehnten der Elektrotechnik. Leipzig: R. Voigtländers Verlag, 1925
[3] *Schäfer, W.:* 75 Jahre Drehstromübertragung Lauffen — Frankfurt a. M. ETZ-A 87 (1966) 24, S. 847—854
[4] *Petersen, W.:* Entwicklung der Krafterzeugung und Kraftübertragung der letzten 50 Jahre in Deutschland. ETZ 51 (1930) 4, S. 107—113
[5] *Hillebrandt, F.:* Zur Geschichte des Drehstroms. ETZ-A 80 (1959) 13, S. 409—421 und 14, S. 453—461
[6] *Muschick, E.:* Entdeckung von Grundlagen der Elektroenergieübertragungstechnik bis 1883 und erste Entscheidungen. ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 9, S. 338 bis 339
[7] *Kofler, E.; Menges, G.:* Entscheidungen bei unvollständiger Information. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1976
[8] *Denkewitz, A.:* Arbeitsunterlagen zum Dialogprogramm VERENA, Veröffentlichung vorbereitet

EA 5728

Zur Schnelligkeit von Schaltgeräten[1)]

J. Maksymiuk, Warschau

Spezielle Probleme der Schnelligkeit treten bei folgenden Schaltgeräten auf:

a) Höchstspannungs-Leistungsschalter
2-Perioden-, 1-Perioden-/Synchron-Schalter
im Zusammenhang mit Stabilitätsproblemen von Elektroenergiesystemen
Schnelles Schalten ermöglicht größere übertragbare Leistung, führt aber zu höheren Anteilen der Gleichstromkomponente im Ausschaltstrom.

b) Begrenzungsschalter
Sie sind bis heute praktisch nur im Niederspannungsbereich lösbar [2].

c) Kurzschließer zum kurzschlußfesten Erden in Schaltanlagen

d) Draufschalter in Hochstrom- und Hochleistungsanlagen.

Obwohl auf verschiedenen technischen Wegen schnelle Schaltgeräte entwickelt werden, bestehen folgende gemeinsame Probleme:

— hohe Antriebsleistung in der Anfangsphase der Bewegung
— Übertragungsgeschwindigkeit der mechanischen Leistung
— Übertragungsgeschwindigkeit der Steuerimpulse
— Schnelligkeit der Auslöser, Schlösser, Ventile.

Nachfolgend werden diese Probleme für Draufschalter und Kurzschließer mit zylindrischen Schraubenfedern als Antriebsenergiespeicher behandelt.

1. Weg-Zeit-Kennlinie eines Leistungsschalters

Aus dem typischen Verlauf der Weg-Zeit-Kennlinie beim Ausschalten eines Leistungsschalters kann man folgende charakteristische Zeitpunkte und -intervalle entnehmen (Bild 1):

t_0—t_1: Zeit des Schutzes und Ansprechzeit des elektromagnetischen Auslösers

t_1—t_5: Eigenzeit des Schalters (beim Ausschalten), enthält folgende Zeitintervalle:

t_1—t_2: vom Anstehen des Auslöseimpulses bis zur Freigabe des Schlosses

t_2—t_3: von der Freigabe des Schlosses bis zum Bewegungsbeginn der Kontakte

t_3—t_4 bzw. t_3—t_5: vom Bewegungsbeginn bis zur Trennung der Hauptkontakte (t_3—t_4) bzw. der Abbrandkontakte (t_3—t_5)

t_5—t_6 bzw. t_5—t_7: kürzeste bzw. längste Lichtbogenzeit beim Ausschalten.

1.1. Zeitintervall t_0—t_1

Das Zeitintervall t_0—t_1 enthält neben der Zeit des Schutzes auch die Ansprechzeit z.B. eines elektromagnetischen Auslösers. Diese Ansprechzeit ist von der Dynamik eines solchen Energieumformers abhängig. Die Schnelligkeit eines Elektromagneten wird vor allem von dessen elektrischer Zeitkonstante bestimmt. Kürzeste Zeiten sind mit Elektromagneten kleiner Windungszahl erreichbar. Sie arbeiten z.B. mit Kurzschlußstromerregung (Niederspannungs-Wechselstrom-Begrenzungsschalter). Gute Ergebnisse werden mit Sperrmagneten oder elektrodynamischen (induktionsdynamischen) Auslösern erzielt [3] [4]. Letztere werden in Begrenzungsschaltern für Gleich- und Wechselstrom angewendet. Als induktionsdynamische Antriebe sind sie notwendig für Höchstspannungs-Synchronschalter.

Ein Sperrmagnet ist ein Haltemagnet, der wesentlich kürzere Eigenzeiten (z.B. 0,1 ms) hat als ein Zugmagnet (Bilder 2 und 3). Sie sind — besonders bei permanentmagnetischer Erregung [3] — einfach im Aufbau. Man muß aber mit möglichst großem Stromanstieg in der Sperrwicklung arbeiten, wenn kurze Eigenzeiten erreicht werden sollen.

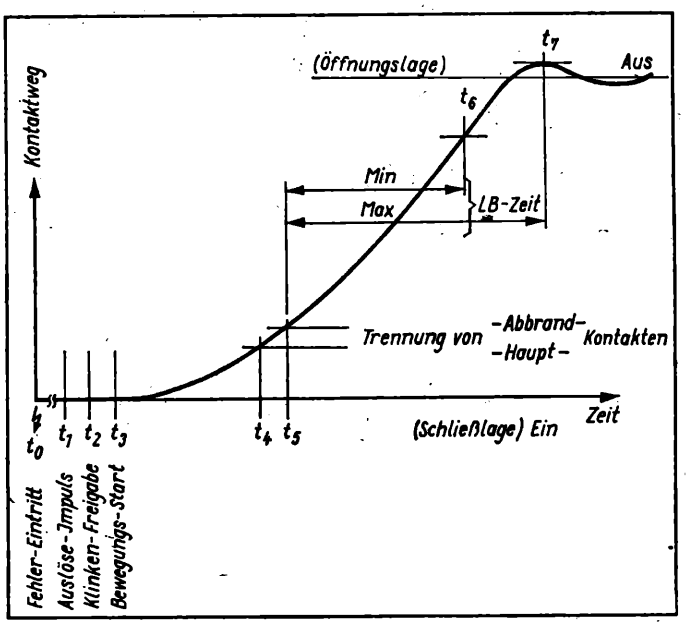


Bild 1. Weg-Zeit-Kennlinie beim Öffnen eines Leistungsschalters

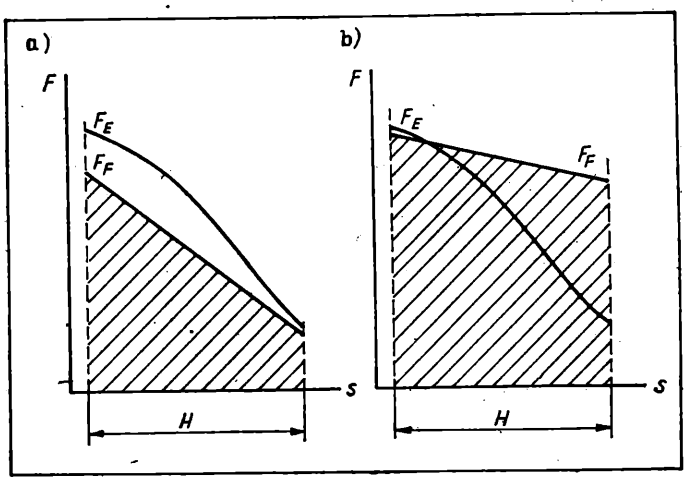


Bild 2. Vergleich der Kennlinien für Zug- (*a*) und Haltemagneten (*b*)
F_E Anziehungskraft im Elektromagnet; F_F Federkraft; H Hubbereich

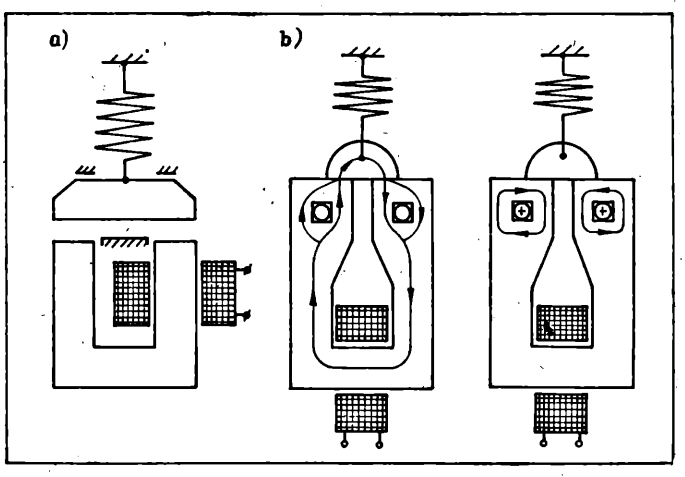


Bild 3. Haltemagnete
a) Bauprinzip; *b*) Sperrmagnet ohne und mit großem Sperrstrom

1.2. Zeitintervall t_1—t_2

Dieses Intervall enthält die Eigenzeit (Ansprechzeit) des Schlosses für den Antriebsspeicher. Das Schloß ist eine kinematische Kette eines mechanischen Verstärkers, dessen Zahl der Glieder (Verstärkungsstufen) vom Verstärkungsgrad abhängig ist. Man kann die Ansprechzeit durch leistungsstarke Auslöser signifikant verringern. Schnelle Schloßarten sind Kugel- oder Nadelschlösser, die mit Haltemagneten oder elektrodynamischen Auslösern gekoppelt sind.

Prof. Dr.-Ing. habil. *Jan Maksymiuk* ist Direktor des Instituts für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Warschau, VR Polen.

[1)] Vortrag, gehalten am 22. 4. 1986 an der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

Tafel 1. Daten zur Übertragung von mechanischen Spannungswellen entlang von Stäben [6] [8]

Material	$E\ \left[\frac{N}{m^2}\right]$	$\varrho\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$c = \sqrt{E/\varrho}\ \left[\frac{m}{s}\right]$
Stahl	$206{,}8 \cdot 10^9$	7750	5150
Aluminium	$689{,}5 \cdot 10^8$	2823	4938
Holz (imprägniert)	$137{,}9 \cdot 10^8$	1273	3261
Melamin-Glas-Gewebe	$124{,}1 \cdot 10^8$	1605	2560
Epoxid-Glas-Gewebe ■	$206{,}8 \cdot 10^8$	2214	3901
Porzellan (elektrot.)	$965{,}3 \cdot 10^8$	2768	5883

1.3. Zeitintervall t_2—t_3

Dieser Anteil der Eigenzeit eines Schalters von der Freigabe des Schlosses vom Antriebs-Energiespeicher bis zum Beginn der Kontaktbewegung ist von den Abmessungen der Schalter, d.h. von deren Nennspannung, abhängig. Diese Zeit beinhaltet die Übertragung der mechanischen Spannungswelle vom Antriebs-Energiespeicher über die einzelnen Glieder und Knoten des Getriebes bis zu den beweglichen Kontakten. Die Geschwindigkeit c der Wanderung einer solchen Welle in festen Stoffen beträgt — unter der Annahme des vom Spannungszustand unabhängigen Elastizitätsmoduls E —

$$c = \sqrt{\frac{E}{\varrho}}. \tag{1}$$

ϱ Dichte des Materials.

Für einen homogenen Stab der Länge l beträgt also die Laufzeit der mechanischen Welle (s. Tafel 1)

$$\Delta t = \frac{l}{c} \tag{2}$$

Für einen zugbelasteten Epoglas-Stab der Länge $l = 6{,}1$ m wurde nach plötzlicher Freigabe eines Endes der Beginn der Schwingungen am anderen Ende nach einer Verzögerung von etwa 2 ms gemessen. Die Übertragung der Spannungswelle über einen biegebelasteten Hebel mit zwei Gelenken dauert etwa 0,8 ms, über ein Gelenk etwa 0,2 ms.

1.4. Zeitintervall t_3—t_4 (bzw. t_3—t_5) und t_5—t_6 (bzw. t_5—t_7)

Die Zeiten vom Beginn der Bewegung bis zum Trennen der Haupt- und Abbrandkontakte (t_3—t_4 bzw. t_3—t_5) sowie die Lichtbogenzeit (t_5—t_6 bzw. t_5—t_7) sind direkt mit dem Bewegungsverlauf der Kontakte verbunden. Entsprechende Berechnungsmethoden wurden bereits dargelegt [7].
Wichtig ist die letzte Phase der Bewegung, das Bremsen. Um schädliche Wirkungen der Reaktionskräfte bei „hartem" Bremsen zu vermeiden, ist der Überschuß an kinetischer Energie durch Reibung zu vernichten.
Wirkungsvolle Lösungen sind:

- Federdämpfer, die mit starker Reibung arbeiten (Teller- und Ringfedern)
- Gummifeder-Dämpfer
- pneumatische oder hydraulische Dämpfer, auch in Kombination mit Federdämpfern.

2. Eigenfrequenzen von zylindrischen Schraubenfedern

Zu den einfachsten Antriebs-Energiespeichern gehören zweifellos Federkraftspeicher. Mit ihrer Hilfe können verhältnismäßig schnelle Schalter gebaut werden.
Die Eigenfrequenzen von plötzlich entspannten Federn sind von ihrer Art abhängig [1].
Die größten Eigenfrequenzen und damit die kürzesten Schaltzeiten kann man mit Hilfe von Stabfedern (Zug- und Drehstab) erreichen. Weniger schnell sind Teller- und Schraubenfedern. Jede Federart ist mit spezifischen Anwendungen und Beschränkungen verbunden. Mit Stab- und Tellerfedern sind nur relativ kleine Federwege technisch nutzbar. Da diese Feder-Arten außerdem zu teuren und technisch komplizierten Lösungen führen, sollte versucht werden, zunächst die Möglichkeiten der zylindrischen Schraubenfedern auszunutzen.
Nach plötzlicher Entlastung einer Schraubenfeder entsteht eine Schwingung, die eine Überlagerung der Schwingungen der einzelnen auf Torsion beanspruchten Windungen darstellt.
Das freie Ende schwingt mit der Grundfrequenz (Eigenfrequenz)

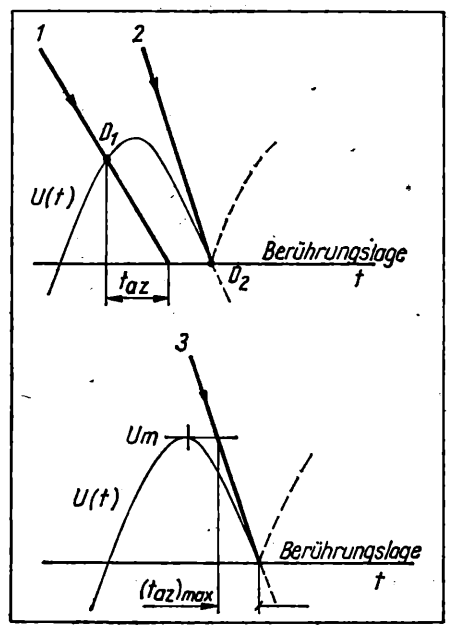


Bild 4
Graphische Ermittlung von Einschaltparametern bei verschiedenen (linearisierten) Verläufen der Durchschlagspannung zwischen den Kontakten
$\frac{du_p}{dt} = -K_z \cdot n \cdot v$
a) Ermittlung des Durchschlagzeitpunktes D;
b) Ermittlung der größtmöglichen Einschalt-Lichtbogen-Dauer $t_{bz\,max}$ für
$\frac{du_p}{dt} = \omega\, U_m$

$$f_e = \frac{d_e}{4\sqrt{2}\, l_c D_c}\sqrt{\frac{G}{\varrho}} \tag{3}$$

d_e Drahtdurchmesser
$l_c = z\pi D_c$ gestreckte Länge der Feder
z Anzahl der aktiven Windungen
D_c Durchmesser der Schraubenfeder
G Schubmodul
ϱ Dichte des Materials.

Bei Belastung mit der Kraft F beträgt der Federweg l

$$l = \frac{8 F z D_c^3}{G d_e^4} \tag{4}$$

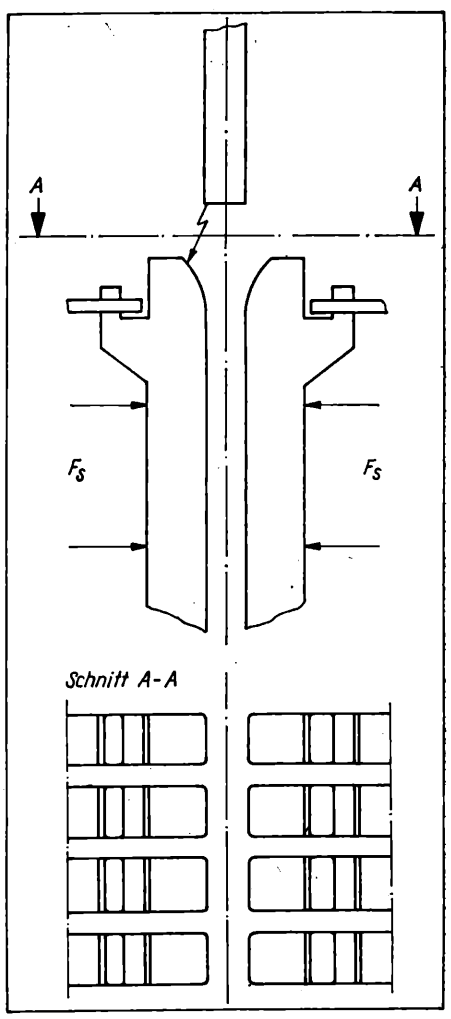


Bild 5 Kontaktanordnung

und die maximale Schubspannung τ_{max}

$$\tau_{max} = \frac{8\,K'\,D_c}{\pi\,d_c^3}\,F \tag{5}$$

$K' = f\,(D_c/d_c)$ Koeffizient (aus Taschenbüchern zu entnehmen).
Aus (3), (4) und (5) folgt für die Eigenfrequenz

$$f_e = \frac{\tau_{max}}{4\sqrt{2}\,K'\,G}\sqrt{\frac{G}{\varrho}}\cdot\frac{1}{l} = k_1\frac{1}{l}. \tag{6}$$

Die Eigenfrequenz f_e ist der Schubspannung τ_{max} proportional. Also ergibt sich der größte Wert für f_e aus dem höchstmöglichen Wert von τ_{max}. Dieser überschreitet normalerweise nicht den Wert

$\tau_{max} = 8 \cdot 10^8\ \mathrm{Nm^{-2}}$.

Aus (6) und (5) ergibt sich

$$f_e = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{2}{\varrho\,G}\frac{D_c}{d_c^3}}\,c \tag{7}$$

$c = F/l$ Federkonstante.

Man kann die Schwingung einer Feder auch mit einer masselosen Feder und einer Ersatzmasse am freien Ende beschreiben. Die Ersatzmasse $(m_F)_{red}$ beträgt etwa ein Drittel der Federmasse m_F [5]:

$$(m_F)_{red} = \frac{1}{3}m_F. \tag{8}$$

Für eine belastete Feder wird zu dieser Masse $(m_F)_{red}$ die auf das Federende reduzierte Masse der angetriebenen Glieder m_{zus} addiert [7], und es ergibt sich die resultierende schwingende Masse m' zu

$$m' = (m_F)_{red} + m_{zus} = \frac{1}{3}m_F + m_{zus}. \tag{9}$$

Daraus errechnen sich die Eigenfrequenzen:
Für eine unbelastete Feder

$$f_e = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{(m_F)_{red}}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{\frac{1}{3}m_F}}. \tag{10}$$

Für eine mit der Masse m_{zus} belastete Feder

$$f_e' = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{m_{zus} + \frac{1}{3}m_F}}. \tag{11}$$

Das Verhältnis dieser beiden Frequenzen beträgt

$$\frac{f_e'}{f_e} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{zus}}{\frac{1}{3}m_F}}}. \tag{12}$$

3. Notwendige Einschaltgeschwindigkeit von Draufschaltern

Nachstehende Ausführungen gelten sinngemäß auch für schnelle Kurzschließer.
Das Einschalten eines Schalters im Hochspannungskreis ist üblicherweise mit einer Vorzündung eines Lichtbogens zwischen den sich nähernden Kontaktstücken verbunden. Das ist abhängig von der Phase des Einschaltens, dem Spannungsverlauf und dem Verlauf der Durchschlagspannung. Das Zusammenspiel dieser Parameter ist für die Einschaltlichtbogendauer und für den Anteil der Gleichstromkomponente im Kurzschlußstromverlauf entscheidend. Der höchste Anfangswert der Gleichstromkomponente tritt beim Einschalten (Beginn des Stromflusses) im Spannungsnulldurchgang auf.
Die Steilheit der Spannung zu diesem Zeitpunkt beträgt (Bild 4):

$$\left.\frac{\mathrm{d}\,U}{\mathrm{d}\,t}\right|_0 = \omega\,U_m. \tag{13}$$

Aus Untersuchungen mit 50-Hz-Wechselspannung an einem Draufschalter (Kontakte nach Bild 5) ergab sich, daß die spezifische Durchschlagspannung (Mittelwert) abhängig vom Abstand l_p zwischen den sich annähernden Kontakten höher ist als für unbewegte Elektroden. Im Bereich $1{,}8\ \mathrm{ms^{-1}} < v_z < 6{,}1\ \mathrm{ms^{-1}}$ ist die spezifische Durchschlagspannung unabhängig von dieser Geschwindigkeit (Bild 6).

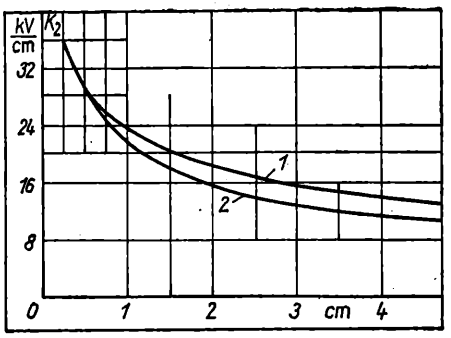


Bild 6
Mittlere spezifische Durchschlagspannungen zwischen Kontakten nach Bild 5
1 unbewegte Kontakte; *2* bewegte Kontakte, Schließgeschwindigkeiten 1,8 m/s bis 6,1 m/s

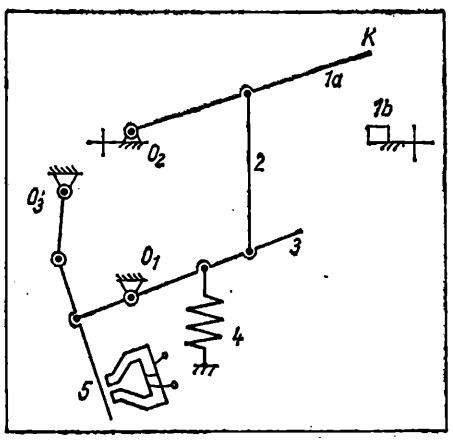


Bild 7
Kinematisches Schema eines Draufschalters
1a beweglicher Kontakt; *1b* Festkontakt; *2* Getriebekoppel; *3* Antriebshebel; *4* Antriebs-(Schließ-)Feder; *5* Schloßgetriebe mit schnellem Auslöser (Sperrmagnet)

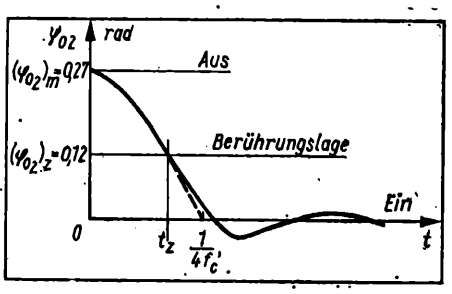


Bild 8
Gemessener Verlauf der Bewegungskennlinie für den Draufschalter nach Bild 7

Die notwendige Einschaltgeschwindigkeit ergibt sich aus folgenden Bedingungen:

a) Um das Einschalten im Spannungsnulldurchgang zu ermöglichen, muß für die Geschwindigkeit v_z' gelten (Bild 4a):

$$v_z \geqq \frac{\omega\,U_m}{K_z\,n} \tag{14}$$

ω Kreisfrequenz
U_m Amplitude der Spannung
K_z spezifische Durchschlagspannung (Bild 6)
n Zahl der Schaltstrecken je Pol.

b) Um eine vorgegebene Einschaltlichtbogendauer $t_{az\,max}$ nicht zu überschreiten, muß für die Geschwindigkeit v_z'' gelten (Bild 4b):

$$v_z'' \geqq \frac{U_m}{K_z \cdot n \cdot t_{az\,max}}. \tag{15}$$

Beispiel:

Im Getriebe eines Hochspannungs-Draufschalters mit der kinematischen Kette nach Bild 7 wurde eine zylindrische Schraubenfeder (Zugfeder) mit folgenden Parametern angewandt:

$D_c = 80$ mm
$d_c = 10$ mm
$F = 1000$ N bei $l = 50$ mm
$m_F = 1{,}8$ kg bei $m_{zus} = 4$ kg
$G = 8{,}1 \cdot 10^{10}\ \mathrm{Nm^{-2}}$
$\varrho = 7{,}86 \cdot 10^3\ \mathrm{kg\,m^{-3}}$

Eigenfrequenz der unbelasteten Feder nach Gl. (7):

$f_e = 28{,}55$ Hz

oder nach Gl. (11)

$f_e = 29{,}05$ Hz.

Bei Belastung der Feder mit der Masse m_{zus} verringert sich die Eigenfrequenz nach Gl. (12) auf:

$f_c' = 10{,}31$ Hz.

Die mechanische Einschaltzeit des Draufschalters vom Bewegungsbeginn bis zur Berührungslage (t_z in Bild 8) kann man mit Annahme eines harmonischen Bewegungsverlaufes des Kontaktmessers O_2 K (Bild 7) bestimmen.
Aus

$$\varphi_{02} = f(t) = (\varphi_{02})_m \cos(2\pi f_c') t$$

folgt

$$(\varphi_{02})_z = (\varphi_{02})_m \cos(2\pi f_c') t_z.$$

Damit gilt für t_z:

$$t_z = \frac{1}{2\pi f_c'} \arccos\left[\frac{(\varphi_{02})_z}{(\varphi_{02})_m}\right] = \frac{1}{2\pi \cdot 10{,}31} \arccos\left[\frac{0{,}27}{0{,}12}\right] = 17{,}3 \text{ ms}.$$

Der gemessene Wert betrug 17,2 ms.
Dieser Draufschalter wurde in einem 50-Hz-Prüfkreis mit $U_m = 15\sqrt{2}$ kV eingesetzt. Für $n = 1$ und $K_z = 24{,}5$ kV/cm (für $l_p = 0{,}88$ cm und $K_z l_p = U_m$; Bild 6) ergibt sich die Geschwindigkeit v_z', um im Spannungsnulldurchgang einschalten zu können:

$$v_z' \geqq \frac{U_m \omega}{K_z n} = 2{,}72 \text{ ms}^{-1}.$$

Im Beispiel mit der Eigenfrequenz f_c', den Winkeln $(\varphi_{02})_m = 0{,}27$ rad und $(\varphi_{02})_z = 0{,}12$ rad (Bild 8) und der Länge $l_{O_2K} = 0{,}3$ m (Bild 7) ergibt sich die Geschwindigkeit des Punktes K nach der Zeit t_z zu

$$(v_K)_z = l_{O_2K} \cdot 2\pi f_c' (\varphi_{02})_m \sin(2\pi f_c') t_z = 4{,}72 \text{ ms}^{-1}.$$

Sie ist höher als der mindestens notwendige Wert $v_z' = 2{,}72$ ms^{-1}.
Aus dem Wert $(v_K)_z = 4{,}72$ ms^{-1} ergibt sich die maximale Einschaltlichtbogendauer $t_{az\,max}$ nach Gl. (15):

$$t_{az\,max} = \frac{U_m}{K_z \cdot n (v_K)_z} = 1{,}8 \text{ ms}.$$

Literatur

[1] *Brückner, P.; Erk, A.:* Federkraftspeicher für Schaltgeräte mit kurzen Schaltzeiten. ETZ-A, 82 (1961) 5, S. 141—147
[2] *Brückner, P.:* Die wachsenden Kurzschlußleistungen und ihre Beherrschung in Niederspannungsanlagen. ETZ-B, 14 (1962) 19, S. 511—519
[3] *Duffing, P.:* Der Sperrmagnet. ETZ-A, 74 (1953) 11, S. 343—346
[4] *Erk, A.:* Strombegrenzende Schnellschalter für Starkstromanlagen. ETZ-B, 14 (1962) 5, S. 169—174
[5] *Fischer, U.; Stephan, W.:* Mechanische Schwingungen. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1981
[6] *Lee, T. H.:* Physics and engineering of high power switching devices. The MIT Press; Cambridge, Mass., London, 1975
[7] *Maksymiuk, J.:* Schaltgerätemechanik. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 11, S. 593 bis 598
[8] *Alekcandrow, G. N.:* Proektirowanie elektritscheskich apparatow. Energoatomisdat, Leningrad, 1985

EA 5729

Please renew your subscription to journal

ELEKTRIE

in time, in order

to provide again the delivery of all issues of the 1987 volume.

We are glad, that you will belong to the readers of our periodical in future, too.

Elektrische Entladungen in Elektrolytlösungen zur Bearbeitung und Behandlung metallischer Werkstoffe

E. Rößner; H. Wicht; G. Marx; Karl-Marx-Stadt

Verwendete Formelzeichen

C	Kapazität
D_P	Leistungsdichte
E_a	Aktivierungsenergie
I	Stromstärke
i	Stromdichte
k_0	Konstante
L	Induktivität
m	Metallabtrag
P_E	Erwärmungsleistung
Q	Ladungsmenge
T_E	Temperatur der Elektrode
T_{EL}	Temperatur der Elektrolytlösung
t	Einwirkungszeit
R	Gaskonstante
U	Spannung
η_{Fe}	Abtragausbeute

Elektrische Entladungen in Elektrolytlösungen lassen sich als eine Form der elektrischen Gasentladung [1] mit einer festen Elektrode (Elektronenleiter) und einer Elektrolytlösung (Ionenleiter) als Gegenelektrode auffassen. Taucht die feste Elektrode in die Elektrolytlösung ein, ist sie also Bestandteil einer elektrochemischen Zelle, so entsteht die Gasphase nicht von vornherein, sondern bildet sich erst unter extremen Elektrolysebedingungen aus. Es werden in der Gasphase Ladungsträger erzeugt, die einen elektrischen Stromfluß ermöglichen und unter dem Einfluß der angelegten Spannung zu einer selbständigen Entladung führen. Solche Entladungsvorgänge können sich über die gesamte eingetauchte Elektrodenoberfläche ausbreiten oder statistisch verteilt an einzelnen Bereichen der Oberfläche auftreten. Oft von Leuchterscheinungen begleitet, wurden Entladungsvorgänge schon seit etwa 100 Jahren in der Literatur beschrieben, teils als wissenschaftliche Kuriosität, in vielen Fällen aber auch mit Hinweisen auf technische Anwendungsmöglichkeiten. Solche Anwendungsmöglichkeiten sind in der Übersicht [2] besonders berücksichtigt.
Ein bedeutender Durchbruch in der technischen Anwendung erfolgte in der Mitte der 40er Jahre in der UdSSR. Das elektrolytische Erwärmen, bei dem ein katodischer Entladungsvorgang in einer alkalicarbonathaltigen Elektrolytlösung zum Aufheizen von Werkstücken für die Wärmebehandlung [3] oder die nachfolgende Warmumformung [4] genutzt wird, wurde in die Produktion eingeführt und in der Folgezeit in allen Industrieländern auf technologische Verwertbarkeit geprüft. Dabei zeigte sich als entscheidender Nachteil der erosive Metallabtrag auf der Werkstückoberfläche [5] [6].
Grundlegende Untersuchungen anodischer elektrischer Entladungsvorgänge in Elektrolytlösungen, durchgeführt im Institut für Angewandte Physik der Akademie der Wissenschaften der Moldauischen SSR [7], erbrachten als abspaltbares Ergebnis, daß sich der in der Literatur beschriebene anodische Erwärmungseffekt [8] vorteilhaft zur chemisch-thermischen Behandlung von Werkstoffen einsetzen läßt [9]. Im Vergleich zu anderen Verfahren der chemisch-thermischen Behandlung sind nur sehr kurze Einwirkungszeiten notwendig.
Die genannten Verfahren sind der Elektrotechnologie [10] zuzuordnen. Bei Elektrolysevorgängen mit elektrotechnologischer Zielstellung waren elektrische Entladungen jedoch zunächst oft unerwünscht. Erst später wurden sie genutzt und führten zu neuen

Dr. rer. nat. *Eckart Rößner* ist wissenschaftlicher Oberassistent, Prof. Dr. sc. techn. *Hans Wicht* Hochschullehrer, Prof. Dr. sc. nat. *Günter Marx* Wissenschaftsbereichsleiter und Direktor der Sektion Chemie und Werkstofftechnik an der TH Karl-Marx-Stadt.

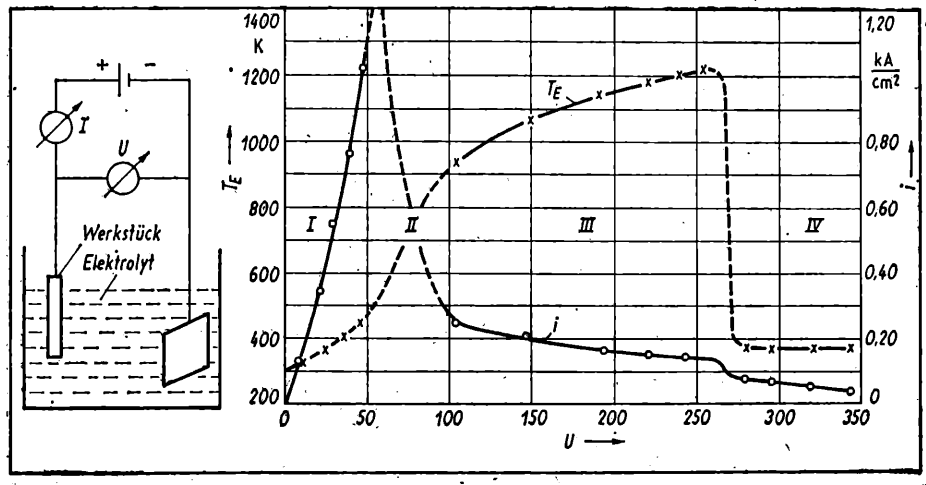


Bild 1. T_E-U- und i-U-Kurven bei der Ausbildung des anodischen Elektrolytplasmas in einer Elektrolysezelle (schematisch)

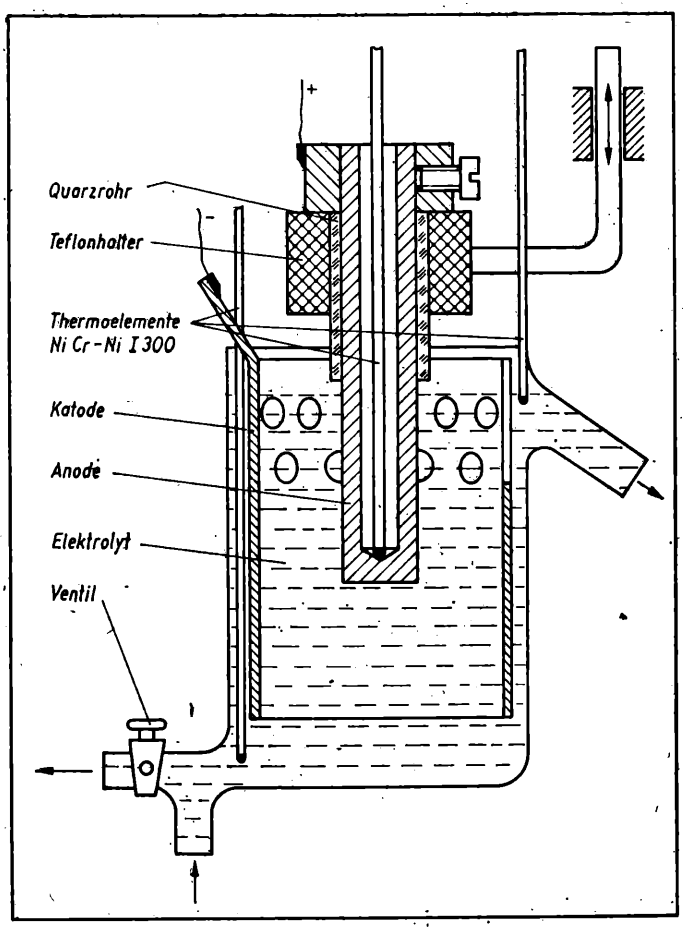
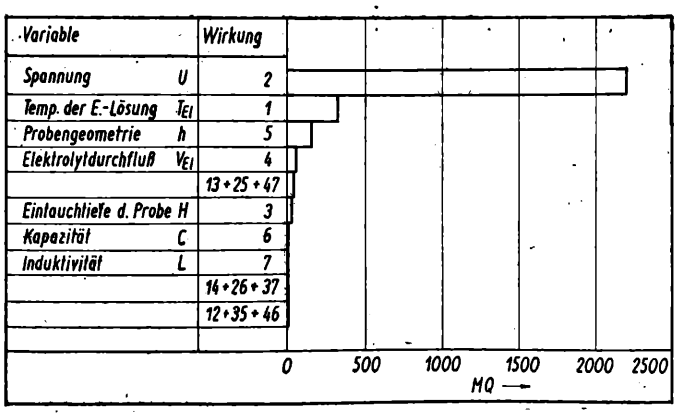


Bild 2. Durchflußzelle zur Untersuchung der Vorgänge im anodischen Elektrolytplasma

Bild 3. Vergleich der Einflußgrößen auf die Elektrodentemperatur über die mittlere Quadratsumme (MQ)



technischen Lösungen. In der elektrochemischen Metallbearbeitung bei hohen Stromdichten (ECM) waren z. B. Entladungsvorgänge als Kurzschlußursache gefürchtet. In der weiteren Entwicklung wurden durch Spannungsimpulse Entladungsvorgänge im Bearbeitungsspalt hervorgerufen und dadurch ein erhöhter Metallabtrag im Vergleich zur reinen ECM erreicht. Es entwickelten sich die elektroerosiv-chemische Metallbearbeitung [11] und weitere Kombinationsverfahren [12].

Bei der Herstellung von Oxidschichten geringer Elektronenleitfähigkeit auf Ventilmetallen, wie Aluminium oder Tantal zur Elektrolytkondensatorproduktion durch anodische Oxydation, versuchte man, den Spannungsbereich, in dem Entladungsvorgänge auftreten, möglichst zu meiden. Später wurden durch anodische Oxydation unter Funkenentladung Schichten mit besonderen Eigenschaften erzeugt [13] [14].

Zur einheitlichen Beschreibung der vielfältigen Erscheinungsformen technisch genutzter Entladungsvorgänge in Elektrolytlösungen bildeten sich vor allem in der sowjetischen Fachliteratur neue Begriffe heraus. Nach [15] wird unter dem Begriff Plasmolyt (russ. plazmolit) ein Niedertemperaturplasma verstanden, das sich bei einem besonderen Regime des Stromdurchganges an der Grenze zweier Phasen (Festkörper/Elektrolyt) bildet und aus den Elektrolyseprodukten der Bestandteile der Phasen, ihrer Dämpfe und/oder aus deren ionisierten Komponenten besteht. Der Begriff ist identisch mit dem Begriff Elektrolytplasma (russ. elektrolitnaja plasma). Weitere abgeleitete Begriffe, wie Plasmolyse (russ. plazmoliz) oder Plasmator (russ. plazmator) und andere Vorschläge sind sicher als Fachtermini auch für den deutschen Sprachgebrauch geeignet.

Bei der Anwendung elektrischer Entladungsvorgänge in Elektrolytlösungen eilen die praktischen Ergebnisse den notwendigen Grundlagenuntersuchungen voraus. Die von uns durchgeführten Arbeiten beschränken sich auf das anodische Elektrolytplasma und dienen dem Ziel, wissenschaftlichen Vorlauf für die Einführung neuer Technologien zur höheren Veredlung von Werkstoffen, vor allem von Eisenwerkstoffen, zu schaffen.

1. Charakterisierung des anodischen Elektrolytplasma

1.1. Strom-Spannungs- und Temperatur-Spannungs-Charakteristik

Im Bild 1 sind für eine Elektrolysezelle, bei der eine Arbeitselektrode und eine großflächige Gegenelektrode in eine geeignete Elektrolytlösung eintauchen, schematisch die Stromdichte i und die Temperatur T_E der Arbeitselektrode eingetragen, die sich einstellen, wenn an die Zelle eine vorgegebene Spannung angelegt wird und sich auf der Arbeitselektrode keine Deckschicht mit geringer Elektronenleitfähigkeit bildet. Es lassen sich vier Bereiche unterscheiden [16]: Bereich der Elektrolyse (I), Bereich der Stromunterbrechung (II), Bereich der Erwärmung durch das Elektrolytplasma (III), Bereich des elektrohydrodynamischen Regimes (IV).

Im Bereich I wird die Stromstärke durch den Widerstand der Elektrolytlösung bestimmt, im Bereich II steigt der Strom anfangs stärker an, erreicht aber keinen konstanten Wert. Es werden periodische Stromunterbrechungen in der Größenordnung von 10^{-4} s mit teilweiser Stromumkehr beobachtet, begleitet von Leuchterscheinungen und knatternden Geräuschen. An der Elektrode entstehen und verschwinden periodisch Gasblasen.

Im Bereich III sinkt bei einer Spannung von > 80 bis 90 V der Strom stark ab. Der Plasmolyt bildet sich als geschlossene Schicht

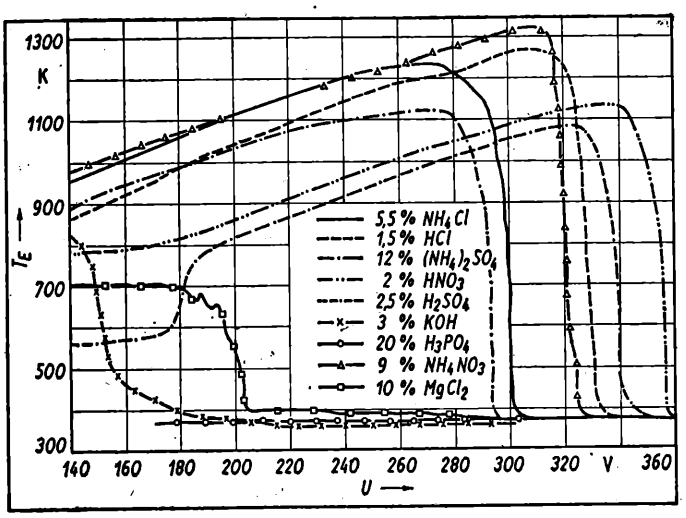


Bild 4. Erwärmungsbereiche verschiedener Elektrolytlösungen (T_{El} = 303 K)

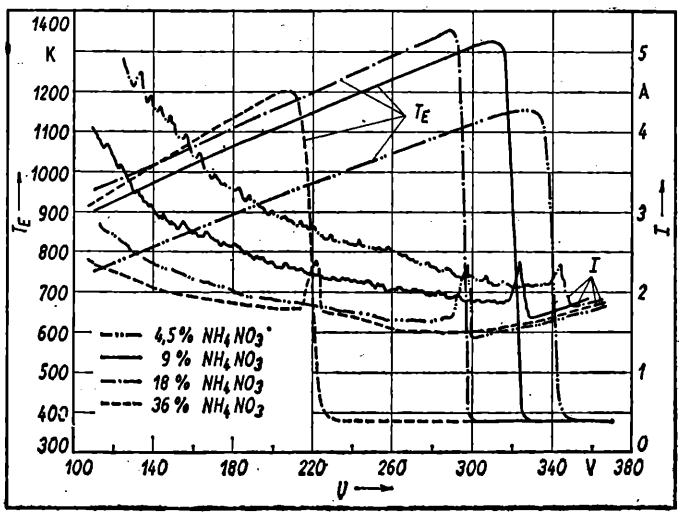


Bild 5. T_E-U- und I-U-Kurven verschiedener Elektrolytkonzentration (Material St 38; T_{El} = 303 K)

um den eingetauchten Teil der Arbeitselektrode mit einer Mindestdicke von 0,05 mm aus. Die Elektrode erwärmt sich in Abhängigkeit von der angelegten Spannung und der eingesetzten Elektrolytlösung auf Temperaturen bis zu 1200 K und darüber. Bei weiterer Erhöhung der Spannung entstehen im Bereich *IV* auf der Lösungsseite des Plasmolyten verstärkt Gasblasen, die Ladungen tragen und durch das elektrische Feld intensiv bewegt werden. Diese elektrohydrodynamische Erscheinung zerstört die geschlossene Schicht des Plasmolyten. Die Elektrolytlösung kontaktiert teilweise die Arbeitselektrode und der Erwärmungseffekt verschwindet.

Im anodischen Elektrolytplasma laufen bisher noch ungeklärte plasmachemische Reaktionen, Stoff- und Wärmetransportvorgänge ab, die Stoffwandlungsvorgänge und Stoffeigenschaftsänderungen an der Werkstückoberfläche bewirken. Im Bereich *III* lassen sich Diffusionsschichten, die das Korrosions- und Verschleißverhalten der Werkstückoberfläche verbessern, erzeugen. Durch Zusätze von kohlenstoff- oder stickstoffhaltigen Verbindungen zur Elektrolytlösung entstehen Aufkohlungs- bzw. Nitrierschichten an Eisenwerkstoffen. Für den praktischen Einsatz dieser Form der chemisch-thermischen Behandlung ist die Festlegung und Regelung einer bestimmten Behandlungstemperatur und die Frage des Werkstoffabtrages von grundlegender Bedeutung. Bild 2 zeigt die Durchflußmeßzelle für die entsprechenden Untersuchungen [17]. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wurde die Wirkung von 7 Einflußgrößen auf die Elektrodentemperatur untersucht. Aus den Ergebnissen im Bild 3 ist zu erkennen, daß sich der Einfluß von Zellspannung und Elektrolyttemperatur besonders stark auswirken, wobei die Temperatur der Elektrode mit zunehmender Elektrolyttemperatur sinkt. Kapazitäten von 3000 µF und Induktivitäten von 0,5 mH im Außenstromkreis haben keinen signifikanten Einfluß.

Weitere Untersuchungen waren darauf gerichtet, die im Bild 1 dargestellten Charakteristika für die Bereiche *III* und *IV* als Kurvenschriebe zu registrieren. Die Form der Kurven ist bei kontinuierlicher Aufzeichnung von der Spannungsvorschubgeschwindigkeit und der Richtung der Spannungsänderung abhängig. Für eine bestimmte Elektrolytlösung wird bei festgelegter Elektrodengeometrie, Elektrolyttemperatur und Elektrolytdurchflußmenge durch die Zelle eine Abhängigkeit entsprechend Bild 1 aufgezeichnet, wenn mit absteigender Spannung registriert wird. Durch Vorgabe der Spannung kann die Temperatur einer Elektrode von 5 mm Durchmesser auf ± 5 K reproduzierbar eingestellt werden. Die Unterschiede von T_E bei steigender und fallender Spannung wurden von uns technisch genutzt, um durch ein geeignetes Spannungsregime die anodische Erwärmung in Elektrolytlösungen zu verwirklichen, die emulgierte Zusätze enthalten [18] [22].

1.2. Einfluß der Zusammensetzung der Elektrolytlösung auf den Bereich der Erwärmung

Im Bild 4 sind für verschiedene Elektrolytlösungen gleicher spezifischer elektrischer Leitfähigkeit T_E-U-Kurven dargestellt [17]. Für einige Elektrolytlösungen, z. B. Kaliumhydroxid, Magnesiumsulfatlösung und Phosphorsäure, ist der Bereich der Erwärmung nur schwach oder überhaupt nicht vorhanden. In Elektrolytlösungen mit deutlich ausgeprägtem Bereich *III* (siehe Bild 5) erhöht sich bei einer vorgegebenen Spannung die Temperatur der Elektrode mit zu-

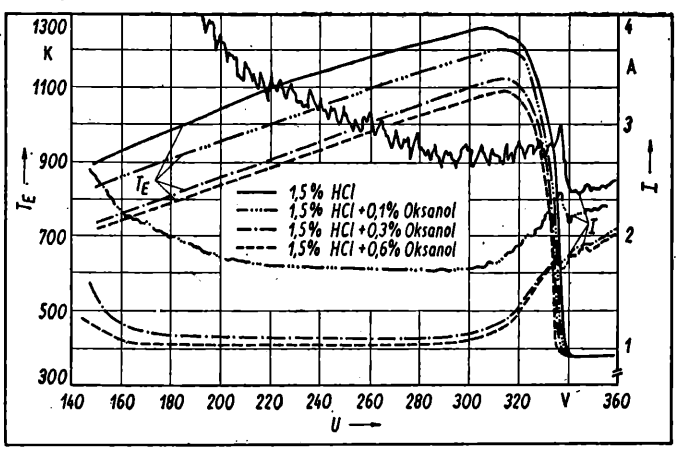
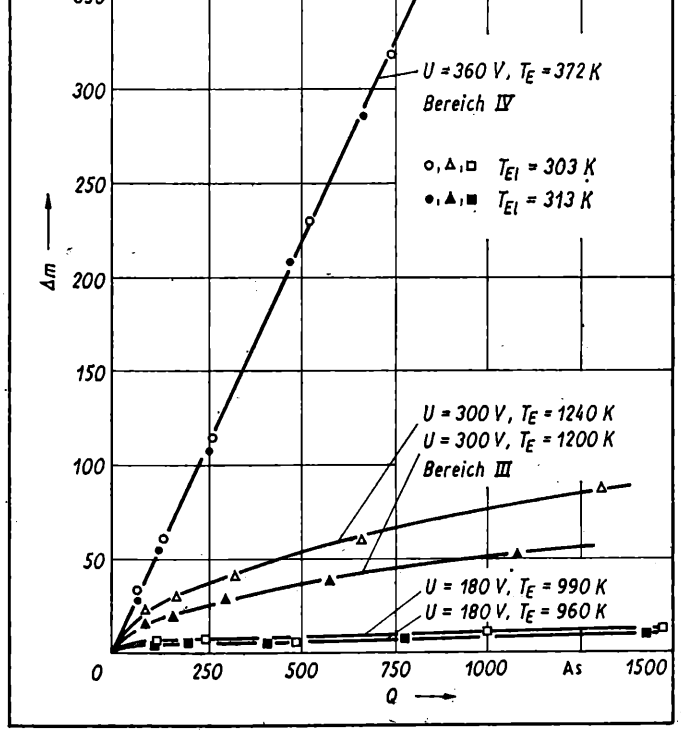


Bild 6. Einfluß eines grenzflächenaktiven Stoffes auf T_E-U- und I-U-Kurven

Bild 7. Metallabtrag in Abhängigkeit von der Ladungsmenge (Elektrolyt 1,5 % HCl; Material St 38)



nehmender Konzentration. Gleichzeitig verringert sich die obere Spannungsgrenze der Erwärmung. Die *I-U*-Kurven im Bild 5 haben die für eine Gasentladung typische fallende Tendenz. Die höchste Elektrodentemperatur wird mit der größten Elektrolytkonzentration erreicht, obwohl für die Stromstärke und damit für die umgesetzte Leistung die niedrigsten Werte gemessen werden. Beim Übergang vom Bereich *III* zum Bereich *IV* ändert sich die Stromstärke nur geringfügig.

Zusätze zur Grundelektrolytlösung, wie z. B. Aceton zum Aufkohlen von Eisenwerkstoffen im Bereich *III*, verringern die Elektrodentemperatur und setzen die Stromstärke herab. Besonders drastisch ist der Einfluß grenzflächenaktiver Stoffe auf die Stromstärke im Bereich *III*. Er ist im Bild 6 am Beispiel des Tensides Oksanol ČS 100 (aus der UdSSR) dargestellt. Die Stromstärke hängt nur geringfügig von der Art des Tensides ab. Der Konzentrationseinfluß des Tensides auf die Verringerung der Stromstärke erreicht einen Sättigungswert.

1.3. Metallbetrag

Das Fehlen des erosiven Metallabtrages bei der Einwirkung des anodischen Elektrolytplasma wird oft als wesentlicher Vorteil im Vergleich zum katodischen Elektrolytplasma angeführt [9]. Untersuchungen, die von uns noch an der Leningrader Polytechnischen Hochschule durchgeführt wurden, zeigten jedoch auch bei der Einwirkung des anodischen Elektrolytplasma eine deutliche Korrosion [19]. Die Bereiche *III* und *IV* verhalten sich dabei unterschiedlich [20]. An Eisenwerkstoffen findet man z. B. in salzsäurehaltigen Grundelektrolytlösungen mit verschiedenen Zusätzen im Bereich *III* Oxidschichten der Zusammensetzung FeO (Wüstit) mit Beimengungen von Fe_3O_4. Im Bereich *IV* ist der Metallabtrag deutlich stärker, die Werkstückoberfläche bleibt blank und erreicht in Abhängigkeit von der eingesetzten Elektrolytlösung mittlerer Rauheiten von $R_z = 0{,}2$ bis 10 µm, die nur von wenigen Feinbearbeitungsverfahren der Verfahrenshauptgruppe Trennen übertroffen werden [17]. Im Bild 7 ist der Metallabtrag bei verschiedenen Spannungen im Bereich *III* und *IV* als Funktion der geflossenen Ladungsmenge dargestellt. Aus dem linearen Zusammenhang für den Bereich *IV* läßt sich eine Abtragausbeute η_{Fe} nach dem Faradayschen Gesetz berechnen. Die Werte liegen für die im Bild 4 aufgezählten Elektrolytlösungen zwischen $\eta_{Fe} = 120$ bis 170 % mit Ausnahme von Natriumnitrat- und Ammoniumnitratlösung, bei denen im Bereich *IV* nahezu kein Metallabtrag stattfindet.

Für den zunächst unübersichtlichen Metallabtrag im Bereich *III* konnte eine Gleichung von der Form

$$\Delta m = \sqrt{k_0 t \exp\left(-\frac{E_a}{RT_E}\right)} \qquad (1)$$

abgeleitet werden [21]. Bei der Behandlung von Werkstücken im Bereich *III* muß also mit einem Metallabtrag gerechnet werden, der mit zunehmender Temperatur des Werkstückes stark anwächst. Der Metallabtrag im Bereich *IV* läßt sich bei einem geeigneten elektrischen Regime für die Bearbeitung der Werkstückoberfläche vor dem Behandeln z. B. zum Reinigen und Kantenrunden nutzen [22].

2. Praktische Anwendung des anodischen Elektrolytplasma

2.1. Chemisch-thermische Behandlung von Eisenwerkstoffen

Die durchgeführten Versuche zum Aufkohlen mit Acetonzusatz zu den Grundelektrolytlösungen, wie Salzsäure oder Ammoniumchlorid [23], zeigten die Übereinstimmung mit Literaturangaben, daß bereits bei Behandlungszeiten von 5 Minuten Diffusionsschichten erhalten werden. Beim Abkühlen der Probe in der Elektrolytlösung bildet sich eine martensitische Randschicht aus, die im Mikrohärteverlauf im Bild 8 deutlich zu erkennen ist. Unsere weiteren Untersuchungen konzentrierten sich vor allem auf das Nitrieren, weil nach dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild eine Aufkohlung erst bei Temperaturen im Austenitgebiet erfolgt, bei denen ein hoher Metallabtrag zu erwarten ist.

Eine Literaturübersicht [24] und das Studium der Patentliteratur [25] zeigten, daß die empfohlenen Elektrolytlösungen zum Nitrieren im Elektrolytplasma häufig freie Salpetersäure oder Ammoniak enthalten. Unsere Versuche, die in der Literatur außerdem empfohlenen Elektrolytgemische von Ammoniumchlorid und Ammoniumnitrat zum Nitrieren in Elektrolytplasma einzusetzen [26], blieben erfolglos [27]. Technisch brauchbare Nitrierschichten an Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt bilden sich erst bei $T_E > 870$ K.

Bild 8
Mikrohärteverlauf nach dem Aufkohlen im anodischen Elektrolytplasma (Material St 38; Elektrolyt 10 % NH_4Cl, 10 % Aceton)

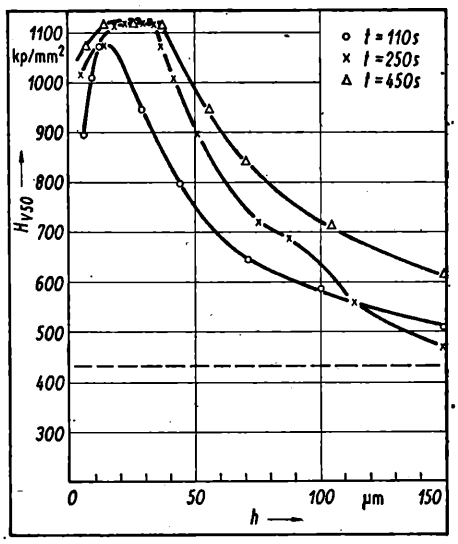
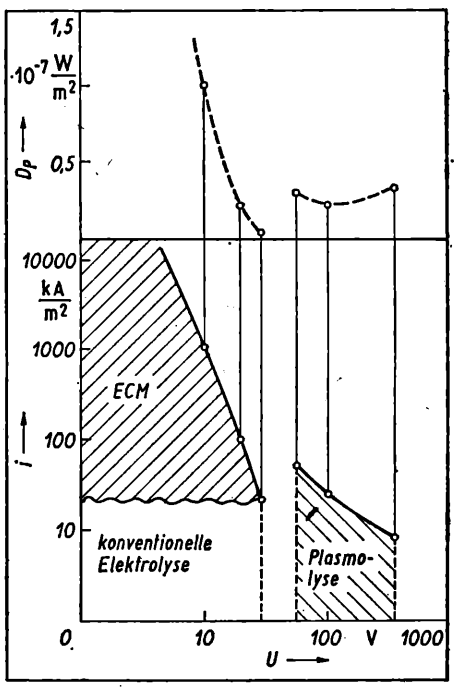


Bild 9
Vorgänge in Elektrolysezellen und umgesetzte elektrische Leistungen (schematisch)



Ein Absinken der Ammoniakkonzentration auf < 3 m % verhindert die Schichtbildung. Die Schichten von einer Dicke 30 bis 70 µm bestehen aus einer Verbindungszone aus ε-Nitrid, einer Zone mit erhöhter Härte aus Restaustenit und Martensit, der die Diffusionszone folgt [28].

Im Elektrolytplasma erzeugte Nitrierschichten haben keinen Porensaum und auf der Außenseite eine dünne Oxidschicht, die Korrosions- und Verschleißverhalten günstig beeinflussen. Beim Nitrieren der Werkstoffe C 45 und 50 Cr V4 im normalgeglühten, weichgeglühten und gehärteten Zustand wurden für gehärtete Proben schon nach 60 s Behandlungszeit maximale Schichtdicken von 30 µm gefunden, die sich nach 300 s sogar geringfügig verringerten. Es findet in Konkurrenz zur Bildung der Nitrierschichten ein Metallabtrag statt, dessen Geschwindigkeit vom Wärmebehandlungszustand abhängt.

2.2. Bearbeitung von Werkstoffen

Durch die grundlegenden Untersuchungen des Metallabtrages im Bereich *IV* findet die Bearbeitung im anodischen Elektrolytplasma Anschluß an schon bekannte Verfahren zur Herstellung von Mikrobohrungen (electro-stream drilling) [29]. Das Verfahren wurde bisher als reine anodische Metallauflösung verstanden.

Bei der Untersuchung des Anfangsstadiums der Ausbildung des anodischen Elektrolytplasma wurde zufällig von uns eine Möglichkeit gefunden, mehrphasische Legierungen, die sich nicht elektrolytisch polieren lassen, im anodischen Elektrolytplasma zu glänzen [36].

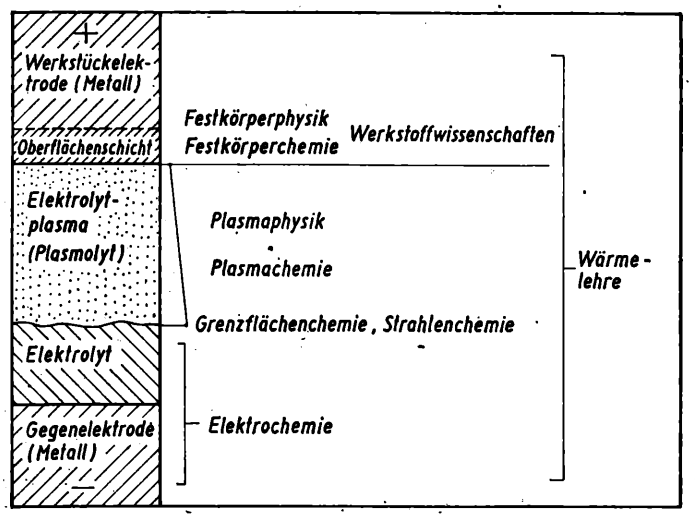


Bild 10. Wissensgebiete zur Aufklärung anodischer elektrischer Entladungsvorgänge in Elektrolytlösungen

2.3. Energiebedarf und Realisierungsaufwand

Nach Ausbildung des anodischen Elektrolytplasma fällt die Spannung nahezu vollständig über dem Plasmolyten ab. Die Leistungsdichten, die dabei zur Wirkung kommen, sind im Bild 9 schematisch dargestellt und mit der ECM verglichen.

Untersuchungen mit einem Durchflußkalorimeter zeigten [30], daß im Bereich *III* 93% der zugeführten elektrischen Energie und im Bereich *IV* 100% an die Elektrolytlösung abgegeben werden (Meßfehler $\pm$ 5%). Die im Plasmolyten erzeugte Wärmemenge, welche über die Elektrode abgeleitet wird, ist gering und wurde aus dem Temperaturgradienten der Probe ermittelt. In 1,5 m% Salzsäure werden bei $T_E = 800$ K 1,2% der zugeführten elektrischen Energie über die Elektrode abgeleitet. Zusatz von 0,1 m% des Tensides E 30 verdoppelt diesen Wert. Als zweckmäßige Vergleichsgrößen für den Energiebedarf verschiedener Elektrolytlösungen zum Erwärmen lassen sich bei einer festgelegten Elektrodengeometrie die Erwärmungsleistung P_E (in W/K) und die Leistungsdichte D_P heranziehen und aus der *I-U-* bzw. T_E-*U*-Charakteristik maschinell berechnen. Die Leistungsdichte liegt für verschiedene Elektrolytlösungen im Bereich $D_P = 0{,}5$ bis $5 \cdot 10^6$ W/m² und dient zur Abschätzung des Energiebedarfs [28].

Für die praktische Anwendung zur Bearbeitung und Behandlung im anodischen Elektrolytplasma sind die notwendigen apparativen Voraussetzungen vor allem für kleinere Werkstücke (Oberfläche < 5 cm²) leicht im Rationalisierungsmittelbau zu schaffen [31].

Aufgebaut werden müssen eine Gleichspannungsquelle mit Steuerung ($U = 100$ bis 300 V; $I_{max} = 20$ A, kurzzeitige Stromspitzen bis 100 A), ein Elektrolytkreislauf mit Kühlung, eine Vorrichtung zur Aufnahme des Werkstückes, die so gestaltet sein kann, daß die Durchflußzelle gleichzeitig die Gegenelektrode bildet. Die kurzen Hauptzeiten und die Möglichkeiten der mikroelektronischen Steuerung sind günstig für Automatisierungslösungen.

Zur Auswahl der Zusammensetzung der Elektrolytlösung und der Verfahrensparameter sind die T_E-*U-* und *I-U*-Kurven und Vorversuche notwendig. Besondere Beachtung verdient der Temperaturgradient im Werkstück, der sich durch geeignete Elektrolytzuführung mindern läßt [32]. Für Werkstücke mit einer Dicke von < 1 mm hat er nach unserer Erfahrung geringe Bedeutung.

3. Ausblick

Bearbeitung und Behandlung von Werkstücken im Elektrolytplasma werden sich vor allem für kleine Teile in dem Maße durchsetzen, wie es gelingt, die Vorteile an praktischen Anwendungsfällen zu nutzen. Nicht die Verdrängung herkömmlicher Verfahren wird dabei im Vordergrund stehen, sondern neue Möglichkeiten, die sich z.B. aus der Kombination mit der galvanischen Abscheidung, dem Funkenlegieren [33] oder durch chemische Reaktionen auf der Werkstückoberfläche ergeben [34].

Der komplexe Charakter der Vorgänge, die im Elektrolytplasma ablaufen, erschwert ihre Untersuchung. Es ist notwendig, zur Aufklärung und weiteren technischen Anwendung die Fortschritte der angrenzenden Wissensgebiete (vgl. Bild 10) zu verfolgen und interdisziplinär zu nutzen. So lassen sich z.B. Gasentwicklung und Metallabtrag im Bereich *IV* mit Hilfe von Erkenntnissen der Strahlenchemie deuten [35].

Literatur

[1] Wissensspeicher Plasmatechnik. Leipzig: Fachbuchverlag 1983

[2] *Faktorovič, A. A.; Galanina, E. K.:* Élektričeskie razrady v elektrolitach. Sb.: Élektrochimičeskaja obrabotka metallov. Kisinev: Štinca 1971, S. 122—130

[3] *Jasnogorodski, J. S.:* Elektrolytisches Härten: Berlin: Verlag Technik 1951

[4] *Muras, V. S.:* Avtomat elektrolitnogo nagreva pri obrabotke davleniem. Minsk: Izd-vo ANBSSR 1960

[5] *Weissgerber, H.; Böhme, H.; Böhme, M.:* Elektrolytische Wärmebehandlung von Stahl. Die Technik, Berlin (1969) 6, S. 413—417

[6] *Eichhorn, E.:* Die elektrolytische Erwärmung von Stählen und ihre Anwendung. Metall 25 (1971) 12, S. 1351—1360 und 26 (1972) 2, S. 110—119

[7] *Lazarenko, B. R.; Fursov, S. N.; Faktorovič, A. A.; Galanina, E. K.; Duradži, V. N.:* Kommutacija toka na granice metall\elektrolit. Kišinev: Akademija nauk MSSR 1971

[8] *Kellog, H. H.:* Anode effect in aqueos electrolysis. J. Electrochem. Soc. 97 (1950) 4, S. 133—142

[9] Progressivnye metodi chimiko-termičeskoj obrabotki. Pod red. *G. N. Dubinina, Ja. D. Kogana.* Moskva: Mašinostroenie 1979

[10] *Conrad, H.; Krampitz, R.:* Elektrotechnologie. Berlin: Verlag Technik 1983

[11] *Kovalenko, V. S.:* Élektrofizičeskie i elektrochimičeskie metody obrabotki materialov. Kiev: Izd-vo „Viša škola" 1975

[12] Elektrochemische Metallbearbeitung. Berlin: Verlag Technik 1984

[13] *Brown, S. D.; Kuna, K. J.; Tran Bao van:* Anodic spark deposition from aqueos solutions of $NaALO_2$ and Na_2SiO_3. J. Amer. Ceram. Soc. 54 (1971) 8, S. 384 bis 390

[14] *Kurze, P.; Krysmann, W.; Marx, G.:* Zur anodischen Oxydation von Aluminium unter Funkenentladung in wäßrigen Elektrolyten. Wiss. Z. der TH Karl-Marx-Stadt 24 (1982) 6, S. 665—671

[15] *Rjabkin, I. P.:* O terminologii pri opisanii processov obrabotki (nagreva) izdelij v elektrolite. Elektronnaja obrabotka materialov (1980) 4, S. 26—27

[16] *Duraži, V. N.; Brjancev, J. V.:* Nekotorye osobennosti nagreva metallov v élektrolitnoj plazme pri anodnom processe. Élektronnaja obrabotka materialov (1977) 1, S. 45—48

[17] *Nguyen dung Tien:* Untersuchung anodischer elektrischer Entladungsvorgänge an Eisenwerkstoffen. TH Karl-Marx-Stadt. Dissertation A 1984

[18] *Suchotin, A. M.; Chorošajlov, V. G.; Zaicev, V. A.; Rößner, E.; Marx, G.; Wicht, H.:* Sostav dlja elektrolitnogo nagreva metallov. US 940329 SU v. 02.03.82

[19] *Rößner, E.; Zaicev, V. A.; Suchotin, A. M.:* Issledovanie korrozii malouglerodistoj stali pri elektrolitičeskoj plazmennoj obrabotke. Naučno-techničeskaja konferencija „Effektivnye metody zaščity ot korrozii", Kišinev 9.—10. 10. 79

[20] *Rößner, E.; Marx, G.; Zaicev, V. A.; Suchotin, A. M.:* Iznos elektroda pri obrabotke malouglerodistoj stali v elektrolitnoj plazme pri anodnom processe. Elektronn. obrab. mat. (1983) 3, S. 59—61

[21] *Zaicev, V. A.; Suchotin, A. M.; Chorošajlov, V. G.; Rößner, E.:* Vysokotemperaturnaja korrosija malouglerodistoj stali v uslovijach elektroplazmennoj obrabotki. Élektronn. obrab. mat. (1983) 5, S. 56—58

[22] *Suchotin, A. M.; Chorošajlov, V. G.; Zaicev, V. A.; Rößner, E.; Marx, G.: Wicht, H.:* Sposob elektrolitnogo nagreva. US 987990 SU v. 07.11. 82

[23] *Šmagina, M. Ja.:* Vlijanie sostava elektrolita na elektrolitnuju plazmennuju obrabotku uglerodistych stalei. Leningrader Polytechnische Hochschule. Diplomarbeit 1979

[24] *Schaufuß, G.:* Praktische Anwendungsmöglichkeiten elektrischer Entladungen in Elektrolytlösungen zur Bearbeitung von Eisenwerkstoffen. TH Karl-Marx-Stadt. Diplomarbeit 1984

[25] *Lippmann, E.:* Patentstudie über die Anwendungsmöglichkeiten elektrischer Entladungen in Elektrolytlösungen an Eisenwerkstoffen. TH Karl-Marx-Stadt. Diplomarbeit 1984

[26] *Belkin, P. N.; Faktorovič, A. A.; Pasinovskij, E. A.:* Élektrolit dlja azotirovanija stal'nych detalej pri anodnom processe. US 621799 SU v. 27. 07. 78

[27] *Serner, P.:* Charakterisierung der Oberflächenschichten von Eisenwerkstoffen nach der Bearbeitung im anodischen Elektrolytplasma. TH Karl-Marx-Stadt. Diplomarbeit 1984

[28] *Töpfer, J.:* Charakterisierung und Herstellung von Oberflächenschichten — erzeugt im anodischen Elektrolytplasma. TH Karl-Marx-Stadt. Diplomarbeit 1985

[29] *Schmitt, P.; Reacock, R.:* Mikrobohrungen. Fertigung 5 (1974) 1, S. 27—33

[30] *Bien, D. V.; Rößner, E.:* Zur Frage der Energiebilanz bei der Bearbeitung im anodischen Elektrolytplasma. Kolloquium TH Karl-Marx-Stadt, Sekt. CWT, WB Chemie 9. 2. 84

[31] *Rößner, E.:* Anodische elektrische Entladungsvorgänge an Eisenwerkstoffen. TH Karl-Marx-Stadt. Abschlußbericht G 4 1985

[32] *Tovarkov, A. K.; Duradži, V. N.:* Nekotorye osobennosti anodnogo processa pri nagreve sprejerom. Élektronn. obrab. mat. (1981) 4, S. 46—49

[33] *Michailov, V. V.; Duradži, V. N.; Gilevič, A. E.; Andreeva, L. N.:* Vozdejstvie iskrovogo razrjada i elektrolitnoj plasmy na poverchnostnyj sloj metallov. Élektronn. obrabotka mat. (1981) 5, S. 26—28

[34] *Duradži, V. N.; Polotebnova, N. A.:* O diffusii volframa v stali pri nagreve v elektrolitnoj plazme. Élektronn. obrab. mat. (1984) 1, S. 35—37

[35] *Rößner, E.; Rabending, K.; Pul'cin, M. N.; Wicht, H.:* Untersuchung anodischer Vorgänge im Elektrolytplasma. Vortrag Hauptjahrestagung Chem. Ges. der DDR 3.—5. 12. 84 in Dresden

[36] *Hoyer, H.; Rößner, E.; Rabending. K.; Kirsche, E.; Hampel, J.:* Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke in anodischem Elektrolytplasma. WP 238074 A 1 DD vom 06.08.86

EA 5656

FACHTAGUNGEN

7. Symposium Elektromaschinenbau

Unter dem Motto „Schritte und Wege zum Angebot optimaler Antriebslösungen" diskutierten am 9. und 10. September 1986 in Leipzig über 200 Entwickler und Anwender elektrischer Maschinen über die Schwerpunkte

- Nutzung der Antriebskomponenten für komplette Antriebslösungen
- Zustandsdiagnose für Antriebe
- Antriebsprojektierung mit modernen Methoden. (Bild 1)

In seiner Eröffnungsrede führte der Generaldirektor des VEB Kombinat Elektromaschinenbau, Prof. Dr. *Hahn*, zum Hauptanliegen folgendes aus:

„Gemeinsam müssen wir, Hersteller und Anwender elektrischer Maschinen, die Wege finden, wie wir den Anforderungen an weltstandsgerechte Verarbeitungsmaschinen und Industrieanlagen heute und morgen gerecht werden. Wir müssen diese Wege finden in Anbetracht der in unserer Volkswirtschaft praktizierten strengen Arbeitsteilung bei der Entwicklung und Produktion von Antriebskomponenten. Heute besteht ja der Antrieb nicht schlechthin aus einem Motor und gegebenenfalls dem Getriebe, heute müssen wir den Antrieb als einen in sich abgestimmten Komplex von elektromechanischem Wandler und Steuer- sowie Regelelektronik sehen, einschließlich der zur Realisierung notwendigen Geber und Sensoren. Einige Kombinate unserer Volkswirtschaft sind also an der Bereitstellung von Antriebskomponenten beteiligt. Mit diesen Kombinaten wünschen wir uns eine gute Zusammenarbeit.

Der VEB Kombinat Elektromaschinenbau fühlt sich für die Realisierung allseitig optimaler Antriebslösungen verantwortlich. Unser Verantwortungsbewußtsein entspricht unseren ökonomischen Interessen:

Bild 1
Arbeitspräsidium: Dr.-Ing. habil. *H. Reiche*, KDT-Aktiv; Dr.-Ing. *H. Halle*, Diskussionsleiter Antriebsprojektierung; Prof. Dr.-Ing. habil. *G. Müller*, Direktionsbereich FuE des VEB Kombinat Elektromaschinenbau Dresden (von links nach rechts).

Erstens sind wir in Entwicklung und Produktion zu höchster Materialökonomie angehalten. Wir dürfen nicht zulassen, daß die in einem Elektromotor enthaltenen Werkstoffe, wie Walzstahl und Kupfer, uneffektiv eingesetzt werden.
Betrachtet man die Mittel, die zur Erhöhung der Materialökonomie beim Einsatz elektrischer Maschinen genutzt werden können, die Mikrorechentechnik und Sensortechnik bei der Zustandsüberwachung, die Rechentechnik in den Personalcomputern für die Projektierung von Antrieben und die Mikrorechentechnik und Leistungselektronik für drehzahlvariable Antriebe, so erkennt man, daß die Nutzung der Mikroelektronik doch eine hervorragende und prinzipielle Möglichkeit zu höherer Materialökonomie ist.

Zweitens müssen die von uns entwickelten und produzierten Antriebskomponenten Welthöchststand verkörpern, d. h., wir müssen nachweisen, daß mit ihnen international konkurrenzfähige Antriebslösungen realisiert werden können. Wir müssen uns also ständig gemeinsam mit den Anwendern den Forderungen der modernen Antriebstechnik neu stellen und unsere Erzeugnisse danach gestalten und schließlich

drittens müssen wir uns auf den internationalen Märkten im Sinne eines Angebots kompletter Antriebe verhalten, so wie es dort üblich ist, denn unsere internationale Konkurrenz hat sich in den letzten Jahren vom Motorenhersteller zum Antriebsanbieter entwickelt. Auch wir wollen deshalb in zunehmenden Maße die Projektierung kompletter Antriebe übernehmen und die dazu erforderlichen Mittel auch für den Export schaffen.

Insbesondere werden wir in den Exportländern ein marktgerechtes Antriebsangebot auf der Basis flexibler und schnell einsetzbarer Projektierungsleistung und auf der Basis der breiten Palette unseres Erzeugnissortiments entwickeln.

Die erste Tagungsgruppe des 7. Symposiums **„Projektierungsleistungen für den Anwender"** war dem sachgemäßeren Einsatz von Elektromotoren gewidmet:

Eine optimale Anpassung der Motorenleistung an das Betriebsproblem bringt einen materialökonomischen Effekt. Heute sind wir von der vollständigen Ausnutzung der Eigenschaften der elektrischen Isolierstoffe im Hinblick auf eine kurzzeitige thermische Überlastbarkeit noch weit entfernt. Gewöhnlich werden nur 60 % der Nennleistung eines Motors zur Lösung des Antriebsproblems genutzt. Das ist aber nicht nur ein materialökonomisches Problem. Unterbelastete Motoren haben einen kleinen Leistungsfaktor und verursachen damit unverhältnismäßig hohe Leitungsverluste.

Die Darlegungen zu neuen, auf Personalcomputern nutzbaren Rechenprogrammen zur automatisierten, antriebsgerechten Auswahl von Asynchronmotoren und von Getriebemotoren einschließlich der zugrunde liegenden mathematischen Modelle (Bild 2)

Bild 2. Arbeitsplatz zur antriebsgerechten Auswahl von Standard-Niederspannungsasynchronmotoren der Reihen KMR und KMER.

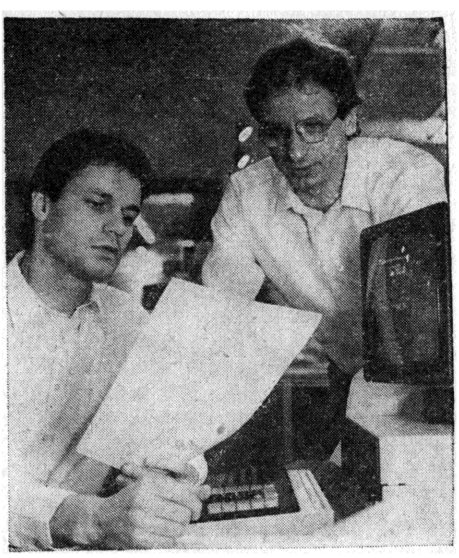
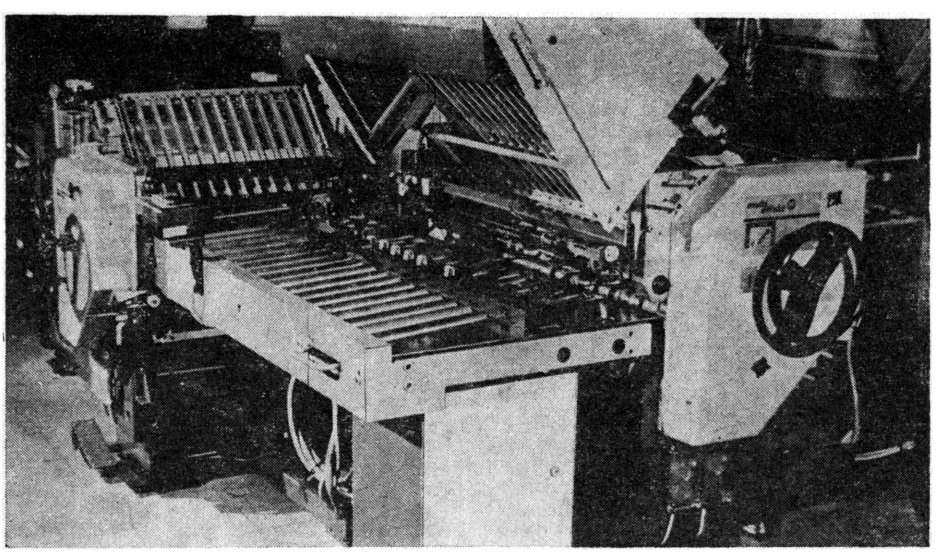


Bild 3. VEM-Frequenzumrichter zur Gestaltung des optimalen Antriebs eines Erzeugnisses des VEB Buchbindereimaschinenwerks Leipzig



fanden ebenso reges Interesse wie die Diskussion über das zukünftige Zusammenarbeiten zwischen dem Hersteller von Antriebskomponenten und dem Konstrukteur von Arbeitsmaschinen und Anlagen beim geschlossenen Entwurf der Technik für den gesamten Energiewandelprozeß. Ein weiterer Schwerpunkt des Erfahrungsaustausches war der Entwurf drehzahlvariabler Drehstromantriebe, für die sowohl die Erzeugnisse des VEB Kombinat Elektromaschinenbau als Motoren, Transistorumrichter und Drehstromsteller als auch die Thyristorumrichter des VEB Kombinat Automatisierungs-Anlagenbau Berlin zum Einsatz kommen.

Für die zukünftige interdisziplinäre Arbeit fand sich ein Kreis von Fachkollegen, der sich im Oktober 1986 zu einer Arbeitsgemeinschaft **„Projektierung elektrischer Antriebe"** als Gremium des KDT-Aktivs im VEB Kombinat Elektromaschinenbau konstituierte.

In der Tagungsgruppe **„Die Antriebsdiagnose als Zukunftsaufgabe"** bildeten Darlegungen zur Zuverlässigkeitsarbeit im VEB Kombinat Elektromaschinenbau den Ausgangspunkt für die Erörterung der Möglichkeit und der Notwendigkeit des Einsatzes der Zustandsüberwachung von Motoren und Antrieben. Das bereits vom VEB Kombinat Elektromaschinenbau entwickelte Diagnosegerät zur Überwachung von Wälzlagern und zur Bestimmung deren Restverfügbarkeit erwies sich als eine bedeutende Hilfe zur Sicherung der Zuverlässigkeit von Antrieben und zur Erhöhung der Verfügbarkeit unserer in der Volkswirtschaft eingesetzten Antriebsmotoren im Zusammenhang mit der Minimierung des Reparaturaufwandes. Als wichtige Wege zum Einsatz dieser Überwachungstechnik wurden das Angebot von mit Diagnosetechnik komplettierten Motoren durch den Hersteller sowie die Ergänzung reparierter Motoren mit Wälzlagerdiagnosegeräten durch die Reparaturbetriebe herausgearbeitet. Die nächsten Schritte bei der Vervollkommnung der Zustandsüberwachung von elektrischen Maschinen im Hinblick auf die Überwachung von Wicklungen wurden durch die Beiträge vorbereitet. Überzeugend waren die Darlegungen des Reparaturbeauftragten des Generaldirektors des VEB Kombinat Elektromaschinenbau, Kollegen *Ullrich*, zur ökonomischen Bedeutung der Diagnosetechnik aus der Sicht der Reparatur und Instandhaltung: In Anbetracht der Millionenwerte, die durch die Antriebstechnik verkörpert werden, ist der Einsatz dieser aus internationaler Sicht neuartigen Technik, beginnend bei den wichtigsten Motoren, unerläßlich. Zahlreiche Interessenten an einem Arbeitskreis **„Zustandsüberwachung elektrischer Maschinen und Antriebe"** haben sich für eine zukünftige Zusammenarbeit, insbesondere aus den Anwenderbereichen, bereiterklärt.

Die Tagungsgruppe **„Die Nutzung des breiten Angebotes von Antriebskomponenten des VEB Kombinat Elektromaschinenbau"** hatte das Ziel, ausgehend von der Darstellung besonders interessanter Sortimente von Antriebskomponenten, wie Getriebemotoren, Kupplungen und Bremsen, leistungselektronischen Stellgliedern, Beispiele für gute Gesamtantriebslösungen als Orientierung für eine zukünftige ideale Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Anwender elektrischer Maschinen herauszustellen. Als ein in dieser Richtung sehr anregender Modellfall kann die Entwicklung drehzahlvariabler Drehstromantriebe auf der Basis von Motoren und Transistorumrichtern des VEB Kombinat Elektromaschinenbau für Falzmaschinen des VEB Buchbindereimaschinenwerke Leipzig gelten. (Bild 3.) In diesem Falle führte die vorbildliche Zusammenarbeit der Antriebsspezialisten zweier Kombinate zu einem internationalen Spitzenprodukt der polygrafischen Industrie. Von diesem Beispiel ausgehend wurden die verschiedenen rechnerischen und experimentellen Methoden zur Auslegung eines optimalen Antriebes diskutiert und erkannt, daß heute noch nicht in vollem Umfange die Projektierungskapazitäten bereitstehen, die das erforderliche Expertenwissen bieten und weiter anreichern. Auf den internationalen Märkten übernehmen in steigendem Maße kleine Projektierungsbüros solche Funktionen, die durch die rasch steigende Komplexität der Antriebslösungen notwendig wurden. Die Gestaltung optimaler Antriebe wird in unserem Lande in Zukunft ein Schwerpunkt der freiwillig-technischen Gemeinschaftsarbeit sein, auf den sich bereits heute das für den September des Jahres 1988 geplante **8. Symposium Elektromaschinenbau** richtet. Eine solche Aktivität erwartet der Generaldirektor des VEB Kombinat Elektromaschinenbau vom KDT-Aktiv, so wie er es in seiner Ansprache zum Ausdruck gebracht hat.

H. Reiche, Dresden EA 2359

Evolution und Kooperation — Mensch und intelligenter Automat

124. Sektionskolloquium Automatisierungstechnik der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt am 19. September 1986

Prof. *Roth* berichtete auf der Grundlage seiner in diesem Jahre an der TU Dresden verteidigten Dissertation B über verschiedene Aspekte der Einordnung der Evolution von Automaten in die Evolution der menschlichen Gesellschaft. Das Ziel des Kolloquiums gipfelte in der Frage: „Was ist zur Erkenntnistheorie zu tun?"

Ausgehend von der Kritik europäischer Erscheinungen vergangener Jahrzehnte bei den Betrachtungen über Computer und Automaten, über den Begriff „Elektronengehirn" und das Verhältnis des Mehschen dazu betonte der Referent, daß der Jugend wesentliche Prozesse der Erkenntnissuche nicht vorenthalten werden dürfen. Der Weg in die Publikation dürfe nicht erst gegangen werden, wenn alle wesentlichen Prozesse abgeklärt sind.

Um den Begriff „Evolution" zu verstehen und verallgemeinern zu können, ist es notwendig, sehr weit in der Entwicklung zurückzublicken, aber auch weit nach vorn zu schauen. Im Vortrag von Prof. *Roth* wurden zunächst die Bewegungsformen der Materie untersucht und die Besonderheiten beim Übergang von niederer zu höherer Bewegungsform — die höhere ist nicht auf die niedere reduzierbar — herausgestellt. Mensch und Automat können nur als Bestandteile der Materie existieren, denn sie bestehen beide aus Atomen und Molekülen. Während beim biologischen Menschen der Stoffwechselprozeß dominiert und der Informationsprozeß implizit darin enthalten ist, gilt das für den Automaten nicht.

Nach der Definition des Begriffes „Intelligenz" gelangte Prof. *Roth* zu der Aussage, daß es unzulässig ist anzunehmen, daß das Phänomen „Intelligenz" nur im Menschen vorhanden sein kann und alles andere nur Imitation sei. Das gegenwärtig allgemeingültige Verständnis des „Intelligenten Automaten", der „künstlichen Intelligenz" geht aus der Simulation menschlicher Intelligenz und Imitation menschlicher Prozesse hervor. Das darf jedoch nicht zu einer Reduzierung auf menschlich-biologische Konstitution führen.

Obwohl die „Nachahmung" eine solide, gängige Methode darstellt, steht jedoch prinzipiell in Frage, ob die Evolution von Automaten *nur* auf Imitation angewiesen sei. Die Frage nach dem Wesen der gesellschaftlichen Bewegungsformen beinhaltet die Frage nach der Evolution der menschlichen Gesellschaft mit dem Menschen als biosoziale Einheit *und* dem Automaten sowohl als technischer Organismus in der Einheit von Stoff-, Energie- *und* Informationsprozessen als auch als maschinell intelligenter Organismus auf der Ebene *subjektfreier relevanter* Bewußtseinsprozesse.

Alle technischen Systeme sind in erster Linie (im Wesen) Bestandteile der gesellschaftlichen Bewegungsformen und nicht der unbelebten oder belebten Materie — beim Faustkeil beginnend. So gesehen waren Fallen und Schlingen bereits urgesellschaftliche Automaten, und es gibt perspektivisch kein relevantes technisches System, das nicht gleichzeitig Automat ist.

Betrachtungen zu mechanischen, energetischen und informationellen Funktionen sowie stofflichen und biologischen Systemen unter dem Aspekt der Entwicklungsrichtung von Automaten führen zu der logischen Erkenntnis, daß

1. Automaten nicht nur das vollbringen, was *vorher* als Algorithmus im Menschen verwirklicht wurde und
2. demzufolge doch ein Ersatz des Menschen durch Automaten nicht das Wesen des Evolutionsprozesses der Produktivkräfte der menschlichen Gesellschaft ausmacht, sondern die prinzipielle *Erweiterung* seines Leistungsvermögens gegenüber der Gesellschaft.

Nach Erläuterung verschiedener Prinzipien von Automaten (Turing-Maschine, Joh.-v.-Neumann-Maschine, Datenflußmaschine), von entwicklungsgeschichtlichen Aspekten und den beiden Formen künstlicher Intelligenz (simulierte und maschinelle) resümierte Prof. *Roth*, daß künftige Automaten objektivierte (subjektfreie) relevante Bewußtseinsprozesse des Menschen repräsentieren und so dem menschlichen Denken adäquate Denkleistungen einbringen werden.

Der Vortrag wurde mit bemerkenswertem Interesse aufgenommen.

G. Tippmann, Karl-Marx-Stadt EA 2360

ICEM '86

In der Zeit vom 8. bis 10. September 1986 wurde erneut die Konferenz über elektrische Maschinen (International conference on electrical machines, ICEM '86) durchgeführt. Neben Plenarvorträgen wurden in Arbeitsgruppen beraten:

- Neue Werkstoffe und Bauelemente, supraleitende Maschinen
- Theorie elektrischer Maschinen
- rechnergestützter Entwurf
- Linearantriebe
- Entwurf, Herstellung, Kühlung,
- parasitäre Effekte, Schwingungen, Geräusche, Verluste
- Modellierung, Identifikation, Prüfung
- Feldtheorie und mathematische Methoden
- stromrichtergespeiste Drehstrommaschinen, Roboterantriebe
- stromrichtergespeiste Wechselstrommaschinen
- Übergangsvorgänge
- Kleinmaschinen, Spezialmotoren permanenterregte Msachinen.

Es wurden insgesamt etwa 300 Vorträge angekündigt, von denen 182 als Postervorträge und 120 in den Fachsektionen zum Vortrag kamen.

Es zeigt sich, daß sich unter dem Einfluß von Mikro- und Leistungselektronik führende Hersteller elektrischer Maschinen der Lieferung kompletter Antriebe zugewandt haben. Das erfolgte insbesondere unter dem Einfluß der Drehstromantriebstechnik, deren Marktanteil in den kommenden Jahren rasch anwachsen wird. Bei den Drehstromantrieben sind sowohl Synchron- als auch Asynchronmotoren vertreten. Im Bereich von Vorschubantrieben dominieren die Synchronmaschinen, im Bereich von Hauptantrieben für Werkzeugmaschinen, z.B. die asynchronen Antriebe. Zusehens erschlossen wird der Bereich sehr großer Drehzahlen und sehr großer Leistungen. Bei den großen Leistungen dominieren Synchronmaschinen bei solchen Aufgaben, wie Fördermaschinen und Walzenstraßen; im Bereich der Pumpen und Verdichter geht es um getriebelose Systeme, bei denen auch wieder auf Synchronmotoren zurückgegriffen wird. Im Vergleich synchroner und asynchroner Antriebe zeigt sich der synchrone insofern günstiger, als die Stromrichter einfacher und billiger sind und die Regelprinzipien wesentlich einfacher als bei Asynchronmotoren beherrscht werden können.

Es zeigt sich in zunehmendem Maße die Tendenz zu tieferem physikalischem Durchdringen der elektrischen Maschinen. Unter diesem Gesichtspunkt widmen sich zahlreiche Referenten den Aufgaben der genaueren Bestimmung der Verluste unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Harmonischer. Darüber hinaus spielt die genaue Bestimmung der Parameter in statischen und dynamischen Betriebsfällen eine zunehmende Rolle zur Gewinnung zuverlässiger Angaben für Modellierung und Simulierung von Antriebssystemen.

Auf dem Gebiet der Turbogeneratoren werden Betrachtungen zur Supraleitung insbesondere in westeuropäischen Ländern angestellt. Es zeigt sich offenbar, daß dabei der Trend zu extrem großen Leistungen mit Rücksicht auf Reservehaltungen nicht gegangen werden wird. Es scheint so zu sein, daß sich Einheitsleistungen zwischen 1000 und 1500 MW herauskristallisieren werden.

Wesentlichen Einfluß auf die weitere konstruktive Gestaltung elektrischer Maschinen hat der Einsatz von hartmagnetischen Werkstoffen, wie Samarium-Kobalt-Verbindungen oder neuerdings Eisen-Neodym-Bor-Verbindungen. In beiden Fällen werden sehr hohe Koerzitivfeldstärken bei hohen Remanenzinduktionen erfaßt. Bei Eisen-Neodym spielt die Frage der Beherrschung des Temperatureinflusses noch immer eine Rolle. Forschungen zur Senkung dieses Einflusses werden betrieben.

Insbesondere durch Japan werden viele Aktivitäten bei der Bereitstellung von Linearantrieben sowohl für industrielle Antriebe als auch im Transportwesen deutlich. Sie werden theoretisch untermauert und durch praktische Beispiele erweitert. Sehr interessant sind in mehreren Fällen Darstellungen über Antriebe für künstliche Herzen sowohl mit rotierenden als auch mit oszillierenden elektrischen Motoren.

Das Problem der Schwingungen und Geräusche erhält unter dem Einfluß der Leistungselektronik vor allem bei Drehstrommotoren zunehmende Bedeutung, und daher wird in zahlreichen Vorträgen auf diese Problematik eingegangen.

Die dreibändigen Tagungsunterlagen liegen vor.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2341

KURZBERICHTE

Komplexe Nutzung von Reserven durch Blindleistungskompensation mit Isokond-Kondensatoren

Die Blindleistungskompensation mit Kondensatoren ist seit vielen Jahren eine äußerst vorteilhafte Methode, Elektroenergie so rationell wie möglich zu nutzen. Dabei ist die Effektivität vom Umfang und von der den jeweiligen Erfordernissen angepaßten Kompensationsart abhängig. Nicht unbedeutend ist in diesem Zusammenhang der technische Entwicklungsstand der Kondensatoren. Die zu erzielenden ökonomischen Ergebnisse der Kompensation werden auch durch Eigenverluste und Lebensdauer der Kondensatoren mit beeinflußt. Auch die aus der Kompensation resultierenden Nebeneffekte, wie Reduzierung der Stromwärmeverluste und die damit verbundene Energieeinsparung sowie die Möglichkeit der Anschlußerweiterung für zusätzliche Verbraucher, sollten mit beachtet werden.

Der heutige Stand bei der Herstellung von Nebenschlußkondensatoren bietet dem Anwender durch eine Vielzahl von techni-

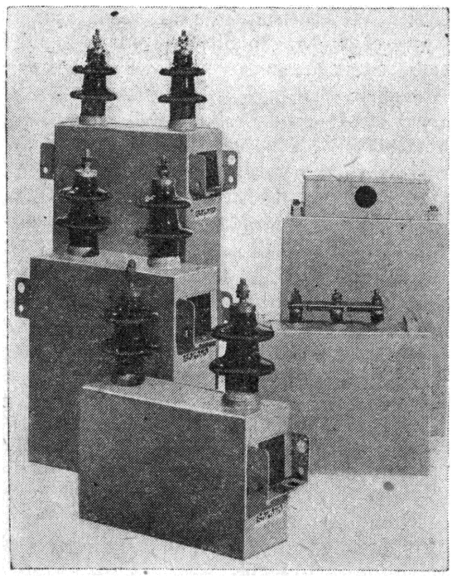


Bild 1. Neue Typepreihe von ISOKOND-Nebenschlußkondensatoren für Nennspannungen von 230 V bis 10,5 kV

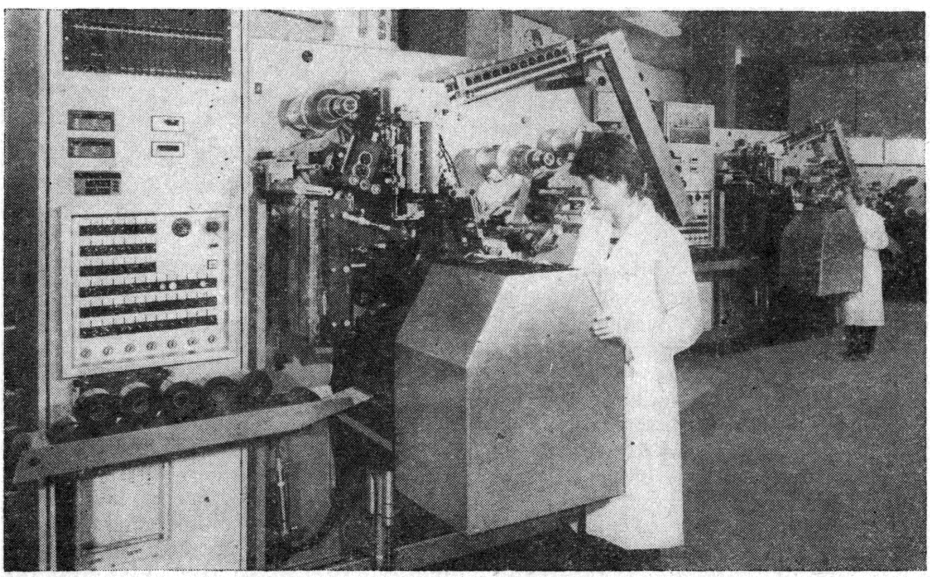


Bild 2. Moderne Anlagen für die Fertigung von Nebenschlußkondensatoren im VEB ISOKOND Berlin

schen Verbesserungen und einer großen Typenvielfalt die Möglichkeit einer uneingeschränkten Nutzung von Reserven bei der Energieanwendung.
Der VEB Isokond Berlin, Betrieb des Kombinats VEB LEW, hat besonders unter Berücksichtigung von Zuverlässigkeit, Eigenverlusten, spezifischer Leistung und Ökologie bei der Entwicklung und Produktion von Kondensatoren neue Wege beschritten. Im Ergebnis stehen praktisch für alle Anwendungsfälle neue Typenreichen von Nebenschlußkondensatoren zur Verfügung (Bild 1), die sich in einer Grobgliederung wie folgt unterscheiden:

- Nebenschlußkondensatoren für den Einsatz in Netzen unter 1000 V, in selbstheilender Ausführung, mit extrem niedrigen Eigenverlusten von $< 0{,}3$ W/kvar Kondensatorleistung, mit Leistungseinheiten von 12,5 bis 60 kvar in Stufen von etwa 10 kvar.
- Nebenschlußkondensatoren mit Nennspannungen über 1 kV, mit hohem spezifischem Leistungsinhalt, einem Masse-Leistungs-Verhältnis von 0,28 kg/kvar, niedrigen Eigenverlusten von $< 0{,}4$ W/kvar, in Standardausführung in den Nennspannungen von 3,15 bis 10,5 kV und Leistungseinheiten von 50, 100 und 150 kvar.
- Filterkondensatoren für Saugkreisanlagen oder für Netze, bei denen aufgrund von Belastungsbedingungen der Einsatz von Kondensatoren der Standardausführung nicht zu empfehlen ist, die im technischen Stand analog den zuvor genannten Nebenschlußkondensatoren sind, mit Nennspannungen von 4,5, 7,5 und 12 kV und die in den Kapazitäten Standard-Induktivität (Drosseln) berücksichtigen.

Für alle neuen Isokond-Kondensatoren-Typenreihen wurden bereits vor Aufnahme der eigentlichen Entwicklungsarbeiten Grundsatzuntersuchungen durchgeführt mit dem Ergebnis zuverlässiger Dielektrikums-Kombinationen unter Nutzung von elektrisch hochwertigen Werkstoffen, wie Polypropylenfolie und ökologisch unbedenklichen Tränkmitteln, zum Beispiel Phenylxylyläthan.
Zur Optimierung des Dielektrikums mußten in der Meß- und Prüftechnik neue Erkenntnisse wirksam werden. Auf der Grundlage von IEC-Empfehlungen erfolgte der Aufbau von Prüfanlagen für praxisnahe, zeitgeraffte Lebensdaueraussagen an kompletten Kondensatoren mit eindeutiger Qualitätsaussage zu den eingesetzten Materialien, der Herstellungstechnologie und der Konstruktion des Dielektrikums. Methoden und Beurteilungskriterien sind zwischenzeitlich standardisiert und in Form von Überwachungsprüfungen zur Qualitätssicherung zwingend vorgeschrieben.
Die Herstellung der Kondensatoren erfolgt auf modernsten Maschinen und Einrichtungen (Bild 2); deren Spitzentechnologie sichert in Verbindung mit den genannten Untersuchungsmethoden eine zwischenzeitlich durch den Industrieeinsatz der Kondensatoren nachgewiesene hohe Zuverlässigkeit und Lebendauer, so daß hierdurch für den Anwender weitere ökonomische Vorteile entstehen.

J. Smolka, Berlin EA 2322

Projektierungsrichtlinie für speicherprogrammierbare Steuerungen

Im Rahmen eines KDT-Objektes wurde im VEB Bandstahlkombinat „Hermann Matern" Eisenhüttenkombinat Ost (VEB BKE EKO) Abt. Prozeßautomatisierung I, eine Projektierungsrichtlinie für speicherprogrammierbare Steuerungen erarbeitet. Die Richtlinie ist für die Bearbeitung komplexer binärer Steuerungsaufgaben geeignet und umfaßt alle Arbeitsschritte von der Formulierung der Aufgabenstellung bis zur Erarbeitung der vollständigen Hard- und Softwaredokumentation.
Während der Erstellung der Projektierungsrichtlinie lagen die Schwerpunkte auf

- einer relativ einfachen Handhabung durch den Nutzer
- einer funktionsgerechten Beschreibung der technologischen Abläufe
- der Anwendung einer einheitlichen, systematischen und weitgehend systemunabhängigen Beschreibungsform von der Aufgabenstellung bis zur fertiggestellten Projektdokumentation in Form eines hierarchisch strukturierten Systems mit dem „Zustandsgraph" als Hauptbeschreibungsmittel
- der verstärkten Nutzung von Rechentechnik zur Projekterarbeitung.

Seit 1985 befindet sich die Projektierungsrichtlinie im Eisenhüttenkombinat Ost im Einsatz. Folgende technisch-ökonomische Vorteile ergeben sich:

- einfache Handhabung durch den Nutzer
- unabhängig von der Gerätetechnik einsetzbar
- servicefreundliche Instandhaltungsdokumentation
- Möglichkeit der verstärkten Nutzung der Rechentechnik
- Minimierung des Projektierungsaufwandes bis zu 20%.

Der Einsatz der Projektierungsrichtlinie ist in allen Projektierungseinrichtungen möglich und spezifisch auf das Gebiet der Steuerungstechnik ausgerichtet.

Ch. Birkner, Eisenhüttenstadt EA 2342

Neue Ergebnisse der TGL-GOST-Abstimmungen

Das Fachministerium für Montage- und Spezialbauarbeiten (MMSS) der UdSSR und das Ministerium für Elektrotechnik und Elektronik (MEE) der DDR stimmten in Fortsetzung gemeinsamer Standardisierungsvorhaben [1] [2] folgende weitere Themenkomplexe zu den Errichtungsvorschriften für elektrotechnische Anlagen in den Jahren 1985/86 ab:

- Technische Forderungen an Kondensatorenanlagen
- Technische Forderungen an in Anlagen eingesetzte Elektromotoren und ihre Schaltgeräte.

Bei den zweiseitigen Abstimmungen konnten vereinheitlichte Grundforderungen sowie deren gemeinsame Anwendung zu den nachfolgend aufgeführten Bereichen vereinbart werden. Diese sind für alle Hersteller, Errichter und Betreiber elektrotechnischer Anlagen in der DDR und in der UdSSR sowie bei Export- und Importverpflichtungen mit einem gemeinsamen Einführungszeitpunkt ab November 1987 verbindlich. Die abgestimmten Grundforderungen werden z.Z. in die geltenden Standards der Länder eingearbeitet.

1. Forderungen an Kondensatorenanlagen

Für Kondensatorenanlagen, die nach den Festlegungen von TGL 200-0611/02 und /03 [3], [4] und PUE V-6 [5] gefertigt und parallel zu den induktiven Blindanteilen elektrotechnischer Wechselstrom-Energiesysteme geschaltet werden und zur Kompensation der Blindleistung auch von weiteren elektrotechnischen Anlagen in der Industrie sowie zur Spannungsregelung bestimmt sind, konnten mit der UdSSR die einheitliche Anwendung

- spezieller Begriffe (Kondensatoren, -anlage, -batterie)
- sicherheitstechnischer Grundforderungen, z.B. Maßnahmen gegen Umwelteinflüsse, Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von gefährlichen und schädlichen Einwirkungen des elektrischen Schlages
- des Einsatzes von Geräten, Kabeln und Leitungen durch Festlegung der zulässigen Belastbarkeit der Betriebsmittel, Schaltungen in Drehstromnetzen und dem Vorhandensein von Schalt- und Entladungseinrichtungen für Kondensatorenanlagen
- der Grundforderungen zum Schutz gegen Überlastung, Kurzschluß- und Überspannungen von Kondensatorenanlagen

abgestimmt werden. Diese Forderungen gelten nicht für Kondensatorenanlagen für Filter- und Spezialanlagen, z.B. der HF-Nachrichtenübermittlung.

2. Forderungen an Elektromotoren und ihre Schaltgeräte

Zu den in ortsfesten elektrotechnischen Anlagen in Innenräumen oder im Freien eingesetzten Elektromotoren und ihren Schaltgeräten, die die in TGL 200-0611/02 und /03 [3], [4] und FUE V-3 [6] festgelegten Bedingungen erfüllen müssen, führten die Partner eine Abstimmung zu nachfolgenden Bereichen durch:

- Allgemeine technische Forderungen zur Ausführung, Auswahl, Schutz und Zuverlässigkeit der Elektromotore und ihre Schaltgeräte
- Spezielle Forderungen zur Auswahl und Installation der in Anlagen eingesetzten Elektromotore. Hierbei sind Festlegungen enthalten zu den Betriebsweisen, den Einsatzbedingungen, z.B. zulässigen Schutzgraden in Innenräumen (Normalräume, feuchte, mit Staub oder explosivstoffengefährdete Räume) im Freien und an Stellen mit Belastung durch chemisch aktive Medien.
- Spezielle Forderungen an die Auswahl der für Elektromotore verwendeten Schaltgeräte. Dazu gehören Festlegungen, daß diese Schaltgeräte ihren elektrischen und mechanischen Kennwerten entsprechen müssen, eindeutig zu kennzeichnen sind, allpolig die Motore abschalten können und für die höchsten Ströme der möglichen Betriebsweisen

(Steuer-, Brems-, Umkehr-, Betriebsstrom) ausgelegt sein müssen.
- Grundforderungen zum Schutz gegen Überlastung, Kurzschluß und Überspannungen der Elektromotoren.

Weitere Abstimmungen mit den entsprechenden Fachministerien der UdSSR zu anderen Themenkomplexen auf dem Gebiet der Errichtung elektrotechnischer Anlagen werden z.Z. vorbereitet.

Literatur

[1] *Kloust, H.:* Abstimmung technischer Forderungen von Akkumulatorenanlagen mit der UdSSR. Der Elektro-Praktiker, Berlin 35 (1981) 3, S. 75

[2] *Kloust, H.:* Abstimmung von Sicherheits- und Errichtungsvorschriften mit der UdSSR. Der Elektro-Praktiker, Berlin 38 (1984) 9, S. 292

[3] TGL 200-0611/02 Geräte in elektrotechnischen Anlagen; Technische Forderungen für den Einsatz in Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselspannung oder 1500 V Gleichspannung. Ausgabe Oktober 1980

[4] TGL 200-0611/03 Geräte in elektrotechnischen Anlagen; Technische Forderungen für den Einsatz in Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1000 V Wechselspannung oder 1500 V Gleichspannung. Ausgabe Oktober 1980

[5] PUE V-6 Errichtungsvorschriften für elektrotechnische Anlagen; Kondensatorenanlagen (UdSSR-Norm) Ausgabe 1985

[6] PUE V-3 Errichtungsvorschriften für elektrotechnische Anlagen; Elektromotoren und ihre Schaltgeräte (UdSSR-Norm) Ausgabe 1985

H. Kloust, Berlin

EA 2333

Ing. Ing. *Heinz Kloust* ist leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter und Koordinierungsbeauftragter für TGL-GOST-Abstimmungen im Kombinat Automatisierungsanlagenbau, Berlin.

Fortsetzung von Seite 444

VEM-Erzeugnisse sind in allen Industriezweigen der DDR anzutreffen. Sie sind entscheidende Faktoren für deren Weiterentwicklung, für die Rationalisierung und Automatisierung der Produktion. VEM-Erzeugnisse sind außerdem auch in jedem Haushalt zu finden, sei es als Antrieb für elektrische Haushaltgeräte, für Phonogeräte, für Heimwerkergeräte oder direkt als elektrische Haushaltgeräte. Sie zeichnen sich durch ihre Zuverlässigkeit und hohe Gebrauchseigenschaften aus. Mehr als die Hälfte der VEM-Erzeugnisse trägt das höchste Gütezeichen der DDR.

Entscheidende Bedeutung haben VEM-Erzeugnisse für die Entwicklung der Außenwirtschaftsbeziehungen der DDR. Der direkte Export von VEM-Erzeugnissen erhöhte sich seit Bestehen des Verbandes um mehr als das Zehnfache. Unter Berücksichtigung des hohen Umfanges von Exportzulieferungen für komplette Industrie- und Energieanlagen, Förderanlagen, Fahrzeug- und Schiffbau, für den Werkzeug- und Textilmaschinenbau u.a. ergibt sich, daß jährlich VEM-Erzeugnisse im Wert von mehreren Milliarden Mark in nahezu 100 Länder geliefert werden. So arbeiten z.B. VEM-Hochspannungsanlagen zuverlässig im internationalen Verbundsystem der europäischen Länder des Rates für Gegenseitige Wirtschaftshilfe, in Griechenland, Ägypten, Algerien, Syrien, Iran, Kuweit usw. Kooperationsbeziehungen bestehen unter anderem mit der Voest-Alpine AG, Österreich, zur gemeinsamen Lieferung in Drittländer. Mit VEM-Numeriksteuerungen und VEM-Antrieben ausgestattete Werkzeug- und Textilmaschinen versehen ihren Dienst in fast allen europäischen Ländern, in Afrika, Asien und Amerika. VEM-Galvanisier- und -Induktionsanlagen bewähren sich sowohl in der Sowjetunion wie auch in Frankreich, Griechenland, der Bundesrepublik Deutschland, Italien, Schweden, der Türkei. Vertretungen bzw. Vertriebsorganisationen bestehen in fast allen europäischen Ländern, in Fern- und Nahost, in Afrika und Australien. VEM-Erzeugnisse haben somit einen festen Platz auf den Märkten in allen Erdteilen.

Die Aufgabe des Warenzeichenverbandes war und ist es, den Erfordernissen dieser Außenhandelsentwicklung zu entsprechen und für das Warenzeichen internationalen Rechtsschutz zu erwerben, zu sichern und in Übereinstimmung mit der Exporttätigkeit seiner Mitglieder zu erweitern. Der Bekanntheitsgrad des Warenzeichens und damit sein Verkehrswert hängt davon ab, mit welcher Qualität die mit diesem Zeichen gekennzeichneten Erzeugnisse geliefert werden und in welcher Häufigkeit sie auf dem Markt erscheinen. Der Verband arbeitet daher eng mit der staatlichen Gütekontrolle sowie mit dem Außenhandel zusammen, um zu gewährleisten, daß die Kennzeichnung der Erzeugnisse mit „VEM" tatsächlich auch die Gewähr für hohe Qualität bietet. Darüber hinaus nimmt der Verband Einfluß auf eine umfassende und einheitliche Anwendung des Zeichens und übt die notwendigen Kontrollen aus. Er gewährleistet das koordinierte Auftreten unter diesem Zeichen. Durch den Zusammenschluß im Verband und das gemeinsame Auftreten aller Mitgliedsbetriebe wurde „VEM" zum Begriff für Leistungskraft und Qualität. Das VEM-Zeichen hat sich zu einem international geachteten Symbol und bedeutenden Werbefaktor entwickelt, der allen Mitgliedsbetrieben zum Vorteil gereicht, aber auch hohe Verpflichtung ist.

Zur Zeit der Gründung des Verbandes war das VEM-Zeichen in 22 Ländern eingetragen; heute genießt es internationalen Rechtsschutz in 96 Ländern.

1961 betrug das Produktionsvolumen der Mitgliedsbetriebe nur knapp 2 Milliarden Mark, 1986 verlassen VEM-Erzeugnisse im Werte von rund 12 Milliarden Mark die Produktionsstätten. Bestimmten 1961 vor allem Elektro-Energieanlagen, Elektromaschinen und Hochspannungs-Schaltanlagen das Produktionsprofil, so hat die Entwicklung der Mikroelektronik, der Automatisierung unter Anwendung der Lichtleiter-, Computer- und Robotertechnik zu einer beachtlichen Sortimentserweiterung und auch -veränderung geführt.

Monteure und Ingenieure gewährleisten auf Baustellen und Objekten in über 50 Ländern den reibungslosen Betrieb der gelieferten Erzeugnisse.

Der Verband stellt sich gemeinsam mit seinen Mitgliedsbetrieben die Aufgabe, den Verkehrswert des VEM-Zeichens ständig zu erhöhen und seinen Ruf als international anerkanntes und geachtetes Qualitätssymbol weiter zu festigen.

H. Müller; P. Deike; Dresden

EA 2313

ZEITSCHRIFTEN

Der Preis für den energetischen Komfort

Gorschkov, S. P.: Energija (1985) 5, S. 51 bis 57

Der Verbrauch von Primärenergieträgern wuchs von 1900 bis 1980 auf das Zehnfache in der Welt. Der Energieverbrauch ist jedoch sehr ungleichmäßig verteilt. So beträgt der Pro-Kopf-Verbrauch in den USA 83000 kWh. Dort kommt die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs im Transportwesen auf die Personenkraftwagen. Bei der Fahrt mit einem Personenwagen der Großklasse ist der Energieverbrauch mit 472 Wh für einen Passagierkilometer höher als in einem Düsenflugzeug. Dagegen beträgt der durchschnittliche jährliche Pro-Kopf-Energieverbrauch in den Entwicklungsländern nur 3600 kWh und in den OPEC-Staaten 4600 kWh. Der Energieverbrauch von Großstädten liegt in der Größenordnung der dort eintreffenden Sonnenenergie. In den Industrie-, Siedlungsballungsgebieten und auf den Transportwegen werden 90% der Energie verbraucht. Nur 10% vom Gesamtenergieverbrauch der Industrieländer werden in der Land-, Forstwirtschaft und für den Fischfang verwandt. Anfang 1970 nahmen allein die Städte und Transportwege folgende Fläche von der Landesfläche ein: Frankreich 4%, Schweden 10%, BRD 11%, Großbritannien 12%, Dänemark 18% und Belgien 23%. In den Ländern mit einer entwickelten Energetik wird die Atmosphäre von einer großen Menge Stickoxiden, SO_2, Chlor und vielen Schwermetallen verschmutzt. Insbesondere die SO_2-Verschmutzung bereitet wegen ihrer negativen Folgen, z.B. saurer Regen, die größten Sorgen. In den skandinavischen Ländern traten zuerst größere Schwierigkeiten mit dem sauren Regen auf, weil die Anfälligkeit der Landschaft gegen die Umweltverschmutzung nach Norden hin zunimmt.

E. Broßmann, Berlin

EA 2053

Die Elektroenergetik Mexikos

Merslikin, A. I.; Peralta P.: Energochosjaistve sa rubeshom 1986, H. 2, S. 40—41

Mexiko zählt zu den rohstoffreichsten Ländern Lateinamerikas. In bezug auf die Erdölvorräte nimmt es nach Venezuela den 2. Platz ein. Es hat große Wasserkraft- und Kohlereserven und gleichfalls Uranerzvorkommen. In der Elektroenergieerzeugung wird Mexiko nur von Brasilien in Lateinamerika übertroffen. Mexiko hatte 1984 eine installierte Kraftwerksleistung von 21150 MW, davon Wärmekraftwerke 13950 MW und Wasserkraftwerke 7200 MW. Die maximale Turbosatzleistung beträgt 60 MW für Gasturbinen-, 180 MW für Wasser- und 300 MW für Wärmekraftwerke.

Das größte Kraftwerk hat eine Leistung von 2400 MW (8 mal 300 MW). Große Verbreitung fanden in Mexiko fahrbare Kraftwerke für die Stromversorgung ländlicher Gebiete. Es gibt davon 62 mit einer Gesamtleistung von 236,8 MW. In den letzten Jahren wurden verstärkt 230- und 400-kV-Leistungen in Betrieb genommen. Die Elektroenergieverluste konnten von 14,2% im Jahre 1973 bis 1984 auf 11,9% reduziert

werden. Bis zum Jahre 2000 soll sich entsprechend dem Plan der Elektroenergiekommission die installierte Kraftwerksleistung fünf- bis sechsmal vergrößern. Große Bedeutung wird den regenerativen Quellen Sonnen- und Ozeanenergien beigemessen. Im Zeitraum von 1996 bis 1998 soll eine 1000-kV-Gleichstromleitung in Betrieb genommen werden.

E. Broßmann, Berlin EA 2262

Die Entwicklung der Elektroenergetik der USA 1984 bis 1985

Faibisovič, D. L.: Energochosjaistve sa rubeshom (1986) 1, S. 1-3

Die installierte Kraftwerksleistung der USA gehört zu 76,8% Konzernen, 10,6% Städten und Bundesstaaten, 3,4% Genossenschaften und zu 9,6% staatlichen Einrichtungen. 1984 wurden mit 2279 TWh 5,6% mehr Elektroenergie als 1983 erzeugt. Die größten Zuwachsraten hat die Großindustrie mit 7,3%. Den größten Elektroenergie-Tarifzuwachs verzeichnet der kommunale Sektor mit 5%. Im Jahre 1984 wurden in die Elektroenergetik 38,6 Milliarden Dollar und 1985 37,5 Milliarden Dollar investiert. Anfang 1985 betrug die installierte Kraftwerksleistung 674000 MW, davon 80590 MW (11,9%) in den 1194 Wasserkraft- und Pumpspeicherwerken, 464743 MW (68,9%) in 905 Wärmekraftwerken, 71720 MW (10,9%) in 56 Kernkraftwerken, 4841 MW (0,6%) in den 777 Dieselkraftwerken und 51795 MW (7,7%) in den 536 Gasturbinenkraftwerken. Für die Elektroenergieerzeugung geht der Einsatz von Heizöl ständig zurück und von Kohle nimmt weiterhin zu. Die mittleren jährlichen Betriebsstunden der Wärmekraftwerke stiegen 1984 auf 3790 h zu 3710 h 1983 und der Kernkraftwerke auf 4550 h zu 4400 h. Die mittleren spezifischen Investkosten beliefen sich 1984 für Kohlekraftwerke auf 890 Dollar/kW und für Kernkraftwerke auf 1220 Dollar/kW. Der Netzausbau entwickelte sich 1984 infolge der Inbetriebnahme mehrerer großer Objekte schneller als sonst.

E. Broßmann, Berlin EA 2240

In der Messe-Vorschau (Heft 2/87) stellen Kombinate neue Erzeugnisse der Elektroindustrie der DDR zur

Leipziger Frühjahrsmesse 1987

unseren Lesern vor.

Die Redaktion

BUCHBESPRECHUNGEN

Zeitdiskrete Steuerungssysteme

Von *M. Günther.* Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 1. Auflage. VEB Verlag Technik, Berlin, 1986. 300 Seiten, 169 Bilder, 25 Tafeln, 66 Literaturstellen. 54 Beispiele, 45 Aufgaben mit Lösungen. Kunstleder 30,— Mark. Bestell-Nr. 553 6044

Der wachsende Einsatz der Mikrorechentechnik zur Lösung von Automatisierungsaufgaben erfordert zunehmend vertiefte Kenntnisse über die Beschreibung, die Analyse und den Entwurf zeitdiskreter digitaler Steuerungs- und Regelungssysteme. Dafür stellt das Buch „Zeitdiskrete Steuerungssysteme" durch die übersichtliche Darstellung, untermauert mit einer Vielzahl von Beispielen und Übungsaufgaben, ein Fachbuch mit Lehrbuchcharakter dar.

Ausgehend von einer theoretischen Durchdringung der Probleme, erfolgt die Ableitung anwendungsbereiter Verfahren und Erkenntnisse, wobei lediglich kybernetische Grundkenntnisse vorausgesetzt werden. Das Buch besticht durch eine übersichtliche und logische Gliederung des Inhaltes.

Mit der mathematischen Beschreibung zeitdiskreter Signale und Systeme in den ersten beiden Abschnitten des Buches wird für die folgenden eine einheitliche Grundlage gelegt, die vor allem auf eine ingenieurtechnische Nutzung orientiert ist. Darauf aufbauend wird in den beiden folgenden Abschnitten die Analyse und Synthese zeitdiskreter digitaler Vorwärtssteuerungen und Regelungen mit Ausgangs- und Zustandsrückführungen behandelt. Von besonderem Wert für den Anwender ist die im folgenden Abschnitt durchgeführte Untersuchung realisierungsbedingter Aufgaben und Probleme bei der Lösung von Automatisierungsaufgaben mit Mitteln der Mikrorechentechnik. Trotz der in vielen Darlegungen des Buches deutlich werdenden Notwendigkeit des Einsatzes von Rechentechnik zum Entwurf zeitdiskreter Steuerungssysteme widmet der Autor diesem Thema einen weiteren Abschnitt, um seiner wachsenden Bedeutung gerecht zu werden.

Auf Grund der bewußten Parallelen hinsichtlich Inhalt und Methodik zu den erschienenen Bänden von *Reinisch* „Kybernetische Grundlagen und Beschreibung kontinuierlicher Systeme" sowie „Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme" ergibt sich damit ein komplexes Werk für analoge und zeitdiskrete Steuerungen und Regelungen.

Das Buch ist besonders zur Ausbildung auf dem Gebiet der digitalen Steuerungs- und Regelungstechnik geeignet. Durch viele Beispiele und Aufgaben wird dabei das Selbststudium besonders unterstützt. In Verbindung mit der anwendungsbezogenen Darstellung von Automatisierungsproblemen eignet es sich aber auch zur Weiterbildung des in der steuerungstechnischen Praxis tätigen Ingenieurs.

H. König, Karl-Marx-Stadt EA 2305

Schaltpläne und Schaltzeichen in der Elektrotechnik/Elektronik

Von *C. Markert.* Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 1. Auflage. 274 Seiten, 122 Bilder, 107 Tafeln. Kunststoffeinband 20,— Mark. Bestell-Nr. 553 207 8

Die Sprache der Ingenieure sind Zeichnungen, Diagramme und Schaltpläne. Wesentliche Informationen werden durch diese vermittelt. Durch die Anwendung der Rechentechnik im Zusammenhang mit dem rechnergestützten Entwurf (CAD) ist die konsequente Standardisierung von Symbolen und Darstellungsmethoden von besonderer Bedeutung. Nicht zuletzt wird auch die internationale Standardisierung immer wichtiger. Wesentliche Fortschritte sind in diesen Richtungen in den vergangenen Jahren erreicht worden, und es ist daher ein begrüßenswertes Vorhaben, daß der Autor im vorliegenden Buch eine zusammenfassende Darstellung anbietet. Auf das Wesentliche sich beschränkend und daher leicht handhabbar, werden behandelt:

Ausführungen von Zeichnungen und Schaltplänen
Schaltzeichen,
Einführung in die Schaltpläne,
Übersichtsschaltplan,
Funktionsschaltplan
Stromlaufplan
Wirkungsplan
Geräte-, Bauschalt,- Anschluß- und Installationsplan
Zeichnungen für Leiterplatten
Graphische Darstellungen.

Im Anhang sind Tafeln mit Schaltzeichen enthalten (etwa 85 Seiten). Es folgt das Verzeichnis der Standards und das Sachwörterverzeichnis.

Die Behandlung des Stoffes ist übersichtlich und leicht handhabbar gelungen, so daß das Buch sowohl für Studierende und Schüler zur Einarbeitung als auch dem Fachmann zum Nachschlagen dienen kann.

Wegen der Vielzahl bestehender Standards und vorhandener Bauelemente sollte es im Besitz eines jeden Fachmannes sein.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2302

Niedervoltindikatoren

Ein Handbuch (Nizkovol'tnye indikatory — Spravočnik)

Von *B. L. Lisicyn* Moskau: Verlag Radio i Svajaz 1985. 1. Auflage. 136 Seiten, zahlreiche Bilder und Tafeln. Broschur 4,—Mark

Die vorliegende Broschüre enthält eine konzentrierte und systematische Darstellung von elektronischen Niedervoltanzeigebauelementen sowjetischer Produktion. Angelehnt an die Entwicklung von der Anzeigeröhre über die Lumineszenzdiode bis zur Flüssigkristallanzeige, hat der Autor auch seinen Stoff in entsprechende Hauptabschnitte gegliedert. Jeder Hauptabschnitt, der eine bestimmte Anzeigebaugruppe und ein bestimmtes Wirkprinzip repräsentiert, beginnt mit allgemeinen Erläuterungen zur grundsätzlichen Arbeitsweise und zu erreichbaren technischen und elektrischen Kennwerten. Daran schließt sich die Vorstellung konkreter Exemplare einstelliger und mehrstelliger Ziffern-, Ska-

len-, Matrix- und Mnemonikanzeigen an, wie sie schon in vielen Geräten der Konsumgüterindustrie vorkommen. Der Verdichtung des zur Verfügung stehenden umfangreichen Materials und der Verbesserung der Übersichtlichkeit dienen die gewählte Gruppenbildung von gleichartigen Bauelementen und ihre technische Beschreibung in Tafeln und Kurzübersichten über mehrere Seiten. Durch die Angaben der Abmessungen und der Pinbelegung erhält der Leser alle Informationen, die er für die Arbeit mit den Indikatoren benötigt.
Es gibt keine zusammenfassende, alphabetisch geordnete Bauelementeliste, sondern für das Aufsuchen eines bestimmten Indikatortyps wird die Kenntnis der Art der Realisierung vorausgesetzt. Das ist nicht besonders nachteilig, da man den meisten Anzeigen schon von außen den physikalischen Wirkmechanismus ansieht. Die Beschreibung der einzelnen Indikatoren ist sehr ausführlich gehalten, sie grenzt an ein technisches Datenblatt bzw. an die Form einer TGL. Somit ist diese Broschüre sowohl für den Entwicklungs- als auch für den Serviceingenieur nutzbringend anwendbar. Einen Analogvergleich mit internationalen Bauelementen nimmt der Autor nicht vor.

G. Turinsky, Karl-Marx-Stadt EA 2329

Elektrische Meßtechnik 1000 Begriffe für den Praktiker

Herausgeber *J. Schultz*. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 1. Auflage. 240 Seiten, 241 Bilder, 17 Tafeln. Pappband 17,— Mark. Bestell-Nr. 553 590 6

Ein Autorenkollektiv unter Leitung von Dipl.-Ing. *Jürgen Schultz* hat sich der Mühe unterzogen, tausend Stichwörter in alphabetischer Reihenfolge zusammenzutragen und zu interpretieren, so daß es dem Nachschlagenden möglich ist, wichtige Begriffe der Meßtechnik erläutert zu finden. Dabei wird immer von einer Definition der Begriffe und einer anfolgenden Erläuterung ausgegangen. Bildliche Darstellung vertiefen das Verständnis. Hinweise auf geltende Normen und Standards sind enthalten. Wichtig ist auch, daß Verweise auf andere Stichworte zur Vertiefung des Verständnisses angegeben sind.
Selbstverständlich sind sowohl die klassischen Begriffe der analogen Meßtechnik als auch die der digitalen Meßtechnik berücksichtigt. Ebenso sind Begriffe enthalten, die durch die Mikroelektronik und Informatik bedingt sind.
Mit dem Buch liegt ein Nachschlagewerk für Lernende in der Berufsausbildung ebenso wie für Studierende und Fachleute vor.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2306

Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann

Von *C.-H. Zieseniß*. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag 1985. 1. Auflage. 163 Seiten, zahlreiche Bilder.

Das Buch Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann, Lampen, Leuchten und ihre Anwendung wendet sich bewußt nicht an den Licht- und Beleuchtungstechniker, sondern an den Elektrofachmann, also an denjenigen, dem die Ausführung und Montage der Beleuchtungsanlage obliegt.
Dabei wird davon ausgegangen, daß die theoretischen Vorkenntnisse auf dem Gebiet der Beleuchtungstechnik gering sind.
In übersichtlicher Form mit vielen Skizzen, Darstellungen und Tabellen werden die Gebiete allgemeine Lichttechnik, Lampen und Lampenarten, Leuchten und Leuchtenarten, Beleuchtungsberechnung, Beleuchtungsanlagen und die Wirkung der optischen Strahlung bündig behandelt.
Der angesprochene Leser erhält ausreichende Auskunft über die Zusammenhänge und die richtige Anwendung der Lampen und Leuchten in den vielfältigen Anlagen.
Die Beleuchtungsanlagen werden auch speziell unter dem Gesichtspunkt der Sanierung alter Anlagen mit Lampen hoher Lichtausbeute und somit geringem Energieverbrauch behandelt.
Allerdings sollte man solche spezifischen Beleuchtungsfälle, wie Bildschirmarbeitsplätze, Beleuchtung von speziellen Sehaufgaben und Sportstättenbeleuchtung, den erfahrenen Beleuchtungsingenieur lösen lassen.
Insgesamt dürfte das Buch seine Aufgabe, dem angesprochenen Leserkreis eine praktische Übersicht der Beleuchtungstechnik zu geben, gut erfüllen.

R. Baer, Berlin EA 2229

Handbuch der Systemtheorie

Von *G. Wunsch; R. Unbehauen; H. Schreiber; M. Locke,; M. Gössel; D. Bochmann; H. Strobel; G. Schwarze*. Berlin: Akademie Verlag 1986. 1. Auflage. 514 Seiten, 180 Bilder, 18 Tafeln, 362 Literaturstellen. Lederin 95, — Mark

Der Entwicklung und den Erkenntnissen auf dem Gebiet der Systemtheorie Rechnung tragend, stellt das „Handbuch der Systemtheorie" für die Identifikation, die Synthese und die Simulation von dynamischen determinierten Systemen ein umfassendes Arbeitsmittel dar.
Es ist anwendungsnah gestaltet und somit auch ohne ein tieferes Studium systemtheoretischer Grundlagen für den am konkreten Aufgaben für Systemlösungen arbeitenden Ingenieur verständlich. Der Inhalt ist übersichtlich gegliedert.
Im Abschnitt 1 werden Begriffe und Benennungen zur Beschreibung und Klassifizierung, sowie Definitionen und wesentliche Eigenschaften und Merkmale von Systemen vorgestellt. Im Anhang des Abschnittes 1 werden notwendige Vorkenntnisse aufgezeigt.
Der Abschnitt 2 umfaßt die Differentialsysteme, gegliedert in:

- lineare Systeme mit stetiger Zeit
- lineare Systeme mit diskreter Zeit und
- nichtlineare Systeme.

Inhaltlich werden hier:

- Methoden der Beschreibung von Systemen
- die Transformationen der einzelnen Darstellungsformen
- die Berechnung von Systemparametern bei bekannten Zeitverläufen der Systemeingangsgrößen und zugehörigen Ausgangsgrößen
- die Berechnung des zeitlichen Verlaufs von Prozeßgrößen in Abhängigkeit von Systemeingangsgrößen und der Systemprozeßgleichungen
- Stabilitätskriterien und Toleranzanalysen

behandelt.
Dieser Abschnitt wird durch übersichtliche Tabellen zur *Z*-Transformation, zur Beschreibungsfunktion ausgewählter Nichtlinearitäten und zu Phasenportraits ergänzt.
Im Abschnitt 3 (Endliche Systeme) wird auf die Definition, Eigenschaften, Prozesse und Verhaltensanalyse von Automaten eingegangen. Zum Entwurf von Automaten werden die Methoden und Algorithmen anschaulich abgehandelt.
Der letzte Abschnitt umfaßt Anwendungen für die Systemidentifikation und -simulation. Dabei wird auch auf die rechnerunterstützte Modellierung und Systemsimulation eingegangen. Als Simulationssysteme werden BORIS, CSMP, SPAS, DIGSIM, DS 4000/DS 4200, SIM-SKR, DISIP, SIMKOM-F, SONCHES und SIMDIS vorgestellt.
Das Buch besitzt ein nach Abschnitten gegliedertes Symbolverzeichnis und ein umfangreiches Sachwortverzeichnis. Das Buch ist somit ein Werk, daß in übersichtlicher Form den neuesten Stand auf dem Gebiet der Systemtheorie darstellt. Es ist für Studenten und Praktiker gut geeignet.

K. Klinger, Karl-Marx-Stadt EA 2321

Prüfungsfragen zum VDE-Vorschriftenwerk

Band 1: DIN VDE 0100/0106/0298. Von *H. W. Kahnau, G. Springer* und *H. Wiedemann*. Sindelfingen: expert verlag GmbH 1986. 244 Seiten

Der 1. Band der Buchreihe über Prüfungsfragen zum VDE-Vorschriftenwerk soll vor allem der Vertiefung der bestehenden Vorschriften und zur Vorbereitung auf Prüfungen von Auszubildenden in der Industrie an Meister-, Techniker- und Ingenieurschulen der BRD dienen. Die Fragen-Antworten-Sammlung stellt außerdem ein willkommenes Hilfsmittel für Prüfer beim Zusammenstellen von Prüfungs-Aufgabensätzen sowie ein übersichtliches und systematisch nach Normen geordnetes Nachschlagewerk zur Auslegung der VDE-Bestimmungen und deren Umsetzung in der Praxis dar. Es schließt somit eine Lücke im Literaturangebot der BRD.
Das Buch behandelt und leitet streng nach Einzelabschnitten der Originalbestimmun-

gen orientiert über 1100 Prüfungsfragen zu den folgenden VDE-Bestimmungen ab:

- DIN VDE 0100 „Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V"
- DIN VDE 0106 „Schutz gegen elektrischen Schlag"
- DIN VDE 0298 „Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen".

Im ersten Bereich wurden Prüfungsfragen zur Errichtung allgemeiner und spezieller elektrotechnischer Anlagen und der in ihnen eingesetzten Betriebsmittel und notwendigen Berechnungsmethoden aufgestellt und dazu präzise auf die gültigen Normen basierende Antworten gegeben. Der Teil zum Schutz gegen elektrischen Schlag gibt die Klassifizierung von Betriebsmitteln für die festgelegten Schutzbereiche an und erläutert die Möglichkeiten, Betriebsmittel in der Nähe berührungsgefährlicher Teile anzuordnen. Im Abschnitt VDE 0298 werden dagegen allgemeine Fragen zur Auswahl, Auslegung und Installation von Kabeln und isolierten Leitungen bis 30 kV behandelt und auch für in der Ausbildung befindliche Werktätige ausführlich beantwortet.
Der vorgestellte Prüfungsband kann für Fachleute der DDR und anderer Länder als Kommentierung der gültigen BRD-Vorschriften verwendet werden.

H. Kloust, Berlin EA 2332

Lichtwellenleiter
Eine Einführung

Von *W. Glaser*. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 2., bearbeitete Auflage. 144 Seiten, 125 Bilder, 8 Tafeln. Broschur 11,—Mark
Bestell-Nr. 553 623 9

Die Lichtleitertechnik wird in den kommenden Jahren sowohl in der Kommunikationstechnik als auch in der industriellen Prozeßautomatisierung zunehmende Bedeutung erlangen. Es ist daher außerordentlich begrüßenswert, daß der Autor, ein bekannter Wissenschaftler auf dem Gebiet der Lichtleitertechnik, eine überarbeitete Auflage seines Buches herausgebracht hat. Dieses Buch ist dadurch gekennzeichnet, daß es in leicht verständlicher Form die physikalischen Probleme so darlegt, daß der lernwillige Suchende sich in die Thematik einarbeiten kann und dabei gleichzeitig doch auch die wissenschaftliche Tiefe des Problems zu erkennen vermag und zum weiterführenden Selbststudium angeregt wird. Durch zahlreiche Abbildungen sinnvoll und anschaulich ergänzt, gibt das Buch einen Überblick über die Probleme des Spektrums zur Kohärenz, über die Fragen der Lichtwellenleiter, die Lichtquellen, die Empfangsstationen, die Bauelemente der optischen Schaltungstechnik, das Messen am Lichtwellenleiter, die Lichtwellenleiter im Nachrichtennetz und die Lichtnachrichtentechnik der Zukunft. Der außerordentlich anschaulich dargestellte Text reizt zum Weiterlesen und ist gleichzeitig eine Anleitung zum Handeln nicht zuletzt dadurch, daß für den tiefergehend Interessierten auch grundlegende mathematische Zusammenhänge dargestellt sind, ohne die man allerdings auch das Buch verstehen kann.
Das vorliegende Werk ist für Schüler, Lehrlinge, Studierende und Fachleute gleichermaßen geeignet, sich in die Thematik einzuarbeiten und auf der Basis dieses Studiums tiefergehende Studien anzustellen. Ein Literaturverzeichnis ergänzt den Stoff. Leider wird in diesem die Arbeit von *Fuchs* und *Göpel* vermißt. Sie sollte in einer späteren Ausgabe ergänzt werden.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2301

VEM-Handbuch
Die Technik der elektrischen Antriebe
Grundlagen

Autorenkollektiv unter Leitung von *R. Schönfeld*. Herausgeber: Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 8., stark bearbeitete Auflage. 561 Seiten, 457 Bilder, 97 Tafeln. Kunstleder 27,50 Mark.
Bestell-Nr. 553 447 9

Seit 1963 gehört das Handbuch zur Standardliteratur auf dem Gebiet der elektromotorischen Antriebe. In allen folgenden Neubearbeitungen ging es, wie auch bei der neuen 8. Auflage, darum, den Inhalt den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen anzupassen. Hier haben insbesondere die Fragen der Weiterentwicklung der Leistungselektronik und der Mikroelektronik für die Stromrichtertechnik und die Ansteuer- und Regelungstechnik eine besondere Rolle zu spielen, weiterhin die damit im Zusammenhang stehende Möglichkeit der stärkeren Anwendung der Drehstromantriebstechnik. Neue Entwurfsverfahren, die mit der rechnergestützten Arbeitsweise möglich werden, spielen eine zunehmende Rolle im Projektierungsprozeß. Die bewährte Gliederung des Stoffes ist im wesentlichen beibehalten worden.
Mit besonderer Aufmerksamkeit sind Probleme der digitalen Drehzahl- und Winkelregelung sowie die Regelung von Drehstromantrieben und die Regelung technologischer verketteter Antriebe aufgenommen worden. Eine Einführung in die Steuerung elektrischer Antriebssysteme, ausgehend von den Grundlagen über Fragen der Informationsverarbeitung, aber auch Probleme der Grundschaltungen und Gerätesysteme, der Beschreibung und Projektierung von Steuerungssystemen und der Steuerungssysteme selbst nehmen einen breiten Raum ein. Damit ist eine umfassende Darstellung des Gesamtgebietes der elektrischen Antriebe gewährleistet, wenn man dabei auch noch berücksichtigt, daß unter den Antriebselementen neben den Grundtypen der Motoren, wie Gleichstrommotoren, Drehstromasynchronmotoren und Drehstromsynchronmotoren auch elektromagnetische Kupplungen, Bremsen, Drehstromsynchronmotoren auch elektromagnetische Kupplungen, Bremsen, Schritt-, Linear- und Vibrationsantriebe mit dargestellt werden. In fünf Anhängen sind die Probleme Aufstellen und Umformen von Signalflußplänen, Berechnung linearer Regelkreise mit Frequenzkennlinien, Berechnung von Systemen mit einfachen Nichtlinearitäten mit der Beschreibungsfunktion, experimentelle Bestimmung dynamischer Kenngrößen und Berechnung dynamischer Vorgänge mit programmierbaren Tisch- oder Taschenrechnern abgehandelt.
Das Buch ist insgesamt in der bewährten praxisorientierten Form geschrieben.
Es gibt Studierenden wie Praktikern eine gute Anleitung zum Einarbeiten und zum Handeln. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis gestattet, tiefergehende Studien anzustellen. Für den oben angegebenen Personenkreis ist es sehr zu empfehlen.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EA 2303

Einheiten — Meßsysteme — SI

Von *D. Bender; E.-E. Pippig*. Berlin: Akademie-Verlag 1986. 5., bearbeitete Auflage. 228 Seiten, 15 Bilder, 5 Tafeln. Broschur 12,50 Mark

Nunmehr liegt das Standardwerk über Größen und Einheiten in der Reihe „Wissenschaftliche Taschenbücher" des Akademie-Verlages bereits in 5. Auflage vor — ein Beweis für die ungebrochene Aktualität der Thematik. Denn leider sind wir ja von einer vollständigen Durchsetzung des Internationalen Einheitensystems noch weit entfernt. Zu viel und zu oft wird noch dagegen verstoßen, nicht nur im täglichen Leben und in den Massenmedien, sondern auch noch in wissenschaftlicher und Fachliteratur. Es wäre zu wünschen, daß recht viele der „Sünder" dieses Büchlein zur Hand nähmen. Eine Änderung der bewährten Konzeption des Buches war nicht nötig; Gliederung und Aufbau wurden beibehalten. Die Bearbeitung erstreckt sich vor allem auf die Abschnitte, die sich mit den seit der letzten Auflage eingetretenen Veränderungen bei der Definition und Darstellung der Einheiten beschäftigen. Das sind vor allem die neue Meterdefinition (1983), die neue Candeladefinition (1979) und die provisorische Temperaturskala von 1976 für den Temperaturbereich von 0,5 bis 30 K. Aber auch an anderen Stellen wurde die Darstellung überarbeitet. So wurden modernere und genauere Darstellungsverfahren ausführlicher beschrieben und der Reproduzierung und Weitergabe der Einheiten mehr Raum gewidmet.
Auch rein äußerlich hat sich gegenüber den Vorauflagen etwas geändert: Das Format und der Schriftgrad sind erfreulicherweise größer geworden. Die so verbesserte Lesbarkeit kommt besonders den Tabellen im Anhang zugute, in denen vermutlich besonders oft nachgeschlagen wird.
Es kann den Autoren bescheinigt werden, daß sie ein nützliches, umfassendes und aktuelles Werk geschaffen haben, das auf die meisten Fragen zum Thema Größen und Einheiten Antworten parat hat.

R. Fischer, Berlin EA 2308

Documentation

Hennig, K.; Richter, E.; Richter, Ed.; Schmidt, A.: **Surface Refinement by Means of Ion Beams**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 445—446, 1 Table, 3 Refs.

Friction, abrasion and corrosion of metals may be reduced significantly with technological relevance by implanting selected ions (metal oxides). The thin layer activation techniques provides for conclusions about the abrasion behaviour of metallic materials already after testing periods, which are short, relatively.

Zacharias, P.; Schiedung, H.; Reißmüller, R.: **Power Modulation Capable Electronic Current Source of CO_2-Lasers**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 447—448, 5 Figs., 6 Refs.

An electronic current source adapted to exciting a CO_2-laser for technological applications is represented. The solution is based upon an electronically controllable oscillating circuit inverter. It provides for a high flexibility, a high efficiency, and a good mass-power-proportion.

Scheibe, H.-J.; Musikowski, H.-D.: **Dimensioning the Current Supply Units of Plasma Spray Plants**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 449—451, 4 Figs., 3 Tables, 2 Equations, 5 Refs.

For developing and reconstructing plasma spray plants may be used both driving inverters and welding rectifiers. Essential adapting modifications, which are necessary to a process, may be done also by the user, whereby the arc ignition in nitrogen requires additional measures.

Rudolph, W.; Hennig, K.; Niese, S.: **Nuclear Analysis of Metallic Materials**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 451—453, 5 Figs., 1 Equation, 6 Refs.

A survey of the nuclear analytical methods of characterizing metallic materials by processing with electron, laser, ion, or plasma beams is represented.

Budig, P.-K.: **The Influence of the Losses on the Reliable Torque of Inverter Feeded Asynchronous Machines**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 454—456, 5 Figs., 2 Tables, 27 Equations, 6 Refs.

A qualitative consideration of the inverter feeded asynchronous machines (ASM) shows, that during operation above the rated speed in working with constant terminal voltage the magnetic hysteresis losses are lower than the ones, which are existing in working in rated operation. On the other hand increased electric heat losses are appearing in the rotor, above all. In two investigated cases a reduction of the total losses by 3···5 % could be observed.

Beckert, U.; Neuber, W.: **Theory of the Dynamic Behaviour of Asynchronous Motors with Bar-Type Rotor**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 457—459, 4 Figs., 30 Equations, 6 Refs.

A theory of the asynchronous motor with current displacing rotor is in the dynamic operation developed. The current displacement is considered by a stepped approximation of the current density distribution in the rotor bars.

Muschick, E.: **Electric Power Transmission Techniques until to Deciding for Three-Phase Current and a Supplementary Decision Model**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 460—462, 1 Table, 6 Equations

This paper deals with the development of the electric power supply in the period between 1884 and about 1905 and, especially, the decision between d.c., a.c., or three-phase current, which was serious at that time. By a supplementary formalizing the decision of the town Frankfurt/a. M. it is computed, in what manner the former selection could be evaluated nowadays. The difficulties of technical decisions by uncertainty are represented and proposals of overcoming the ones are made.

Maksymiuk, J.: **To the Speed of Switchgears**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 463—466, 8 Figs., 1 Table, 15 Equations, 8 Refs.

The speed of switchgears, e.g. characteristic values of the movement behaviour and transmission speed of mechanical powers and control impulses, is illustrated and parameters of top switches and short circuiters with consideration of the natural frequencies of helical springs are dealt with.

Rößner, E.; Wicht, H.; Marx, G.: **Electric Discharges in Electrolytical Solutions Adapted to Working and Processing Metallic Materials**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, pp. 466—470, 10 Figs., 1 Equation, 35 Refs.

The new branch of the electric technology, the higher refinement of metallic materials through working and processing in the anodical electrolytical plasma, is not yet rteated fully with regard to its technical application possibilities. The represented results are acting as a base of determining technological parameters of the methods.

Документация

Хенниг, К.; Рихтер, Э.; Рихтер, Эд.; Шмидт, А.: **Отделка поверхности посредством ионных лучей**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 445—446, 1 табл., 3 лит.

Возможно существенное уменьшение трения, износа и коррозии металлов путем имплантации выбранных ионов (металлоидов) с технической релевантностью.
После сравнительно короткого времени опробования, техника активизации тончайших слоев дает заключения по вопросу изнашиваемости металлических материалов.

Цахариас, П.; Шидунг, Х.; Райсмюллер, Р.: **Электронный модулируемый по мощности источник тока для лазера на CO_2**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 447—448, 5 рис., 6 лит.

Представляется электронный источник тока, предназначенный для возбуждения лазера на CO_2 для технологических целей. Решение основывается на электронно управляемом преобразователе колебательного контура. Оно отличается высокой гибкостью, высокой эффективностью и выгодным соотношением массы и мощности.

Шайбе, Х.-Й.; Музиковски, Х.-Д.: **Оформление устройства электропитания для металлизации пласменной струей**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 449—451, 4 рис., 3 табл., 2 уравн., 5 лит.

При разработке и реконструкции установок для металлизации пласменной струей могут использоваться как приводные вентильные преобразователи тока, так и сварочные выпрямители. Возможна, в случае необходимостик модификация их самым потребителем для согласования с процессом, при чем зажигание электрической дуги в азоте требует принятия дополнительных мер.

Рудольф, В.; Хенниг, К.; Низе, З.: **Ядерная аналитика для металлических материалов**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 451—453, 5 рис., 4 уравн., 6 лит.

Дается обзор по методам ядерного анализа для характеризации металлических материалов после обработки их электронным, лазерным, ионным или пласменным излучением.

Будиг, П.-К.: **Влияние потерь на допустимый вращающий момент асинхронных машин с питанием от вентильных преобразователей тока**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 454—456, 5 рис., 2 табл., 27 уравн., 6 лит.

Качественное рассмотрение асинхронных машин с питанием от вентильного преобразователя тока показывает, что в случае работы выше номинальной скорости вращения, при условии работы со стабильным напряжением на зажимах, потери на перемагничивание ниже, чем при работе в номинальных условиях. С другой стороны возникают повышенные тепловые потери, прежде всего в роторе. В двух исследованных случаях отмечено уменьшение общих потерь на 3...5 %.

Беккерт, У.; Нойбер, В.: **Теория динамического поведения асинхронных двигателей с глубокофазным ротором**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 457—459, 4 рис., 30 уравн., 6 лит.

Развивается теория асинхронного двигателя с ротором с вытеснением тока в динамическом режиме. Вытеснение тока учитывается путем ступенчатого приближения распределения плотности тока в стержнях роторной обмотки.

Мушик, Э.: **Техника передачи электроэнергии в периоде до принятия решения об использовании трехфазного тока и дополнительная модель решения постфактум**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 460—462, 1 табл., 6 уравн.,

В статье рассматривается развитие электроснабжения в периоде от 1884 года до приблизительно 1905 года, а в частности веское в свое время решение об использовании постоянного, переменного или трехфазного тока. Путем формализации постфактум решения, принятого городом франкфурт на Майне приводится расчет, как можно было бы оценивать сегодня тогдашнийвыбор. Рассматриваются трудности принятия технических решений в условиях неизвестности и выдвигаются предложения по преодолению их.

Максымюк, Й.: **О быстродействии коммутационных аппаратов**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 463—466, 8 рис., 1 табл., 15 уравн., 8 лит.

Рассматривается быстродействие коммутационных аппаратов, т.е. показатели характеристики движения и скорости передачи механических мощностей и импульсов управления, обсуждаются параметры выключателей ударного включения и короткозамыкателей с чуетом собственной частоты винтовых пружин.

Рёсснер, Э.; Вихт, Х.; Маркс, Г.: **Электрические разряды в растворах электролита для обработки и отделки металлических материалов**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 12, стр. 466—470, 10 рис., 1 уравн., 35 лит.

Молодая отрасль электротехнологии, достижение повышенного качества металлических материалов путем обработки и отделки их в анодной пласме электролита, еще не исчерпана по своим возможностям технического применения. Представленные результаты являются основой для определения технологических параметров способов.

Dokumentation

Hennig, K.; Richter, Edgar; Richter, Emil; Schmidt, A.: **Oberflächenveredlung mittels Ionenstrahlen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 445—446, 1 Tafel, 3 Lit.

Reibung, Verschleiß und Korrosion bei Metallen lassen sich durch Implantation ausgewählter Ionen (Metalloide) mit technischer Relevanz signifikant reduzieren. Die Dünnschichtaktivierungstechnik liefert bereits nach relativ kurzen Versuchszeiten Aussagen zum Verschleißverhalten metallischer Werkstoffe.

Zacharias, P.; Schiedung, H.; Reißmüller, R.: **Leistungsmodulierbare elektronische Stromquelle für CO_2-Laser**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 447—448, 5 Bilder, 6 Lit.

Es wird eine elektronische Stromquelle zur Anregung eines CO_2-Lasers für technologische Zwecke vorgestellt. Die Lösung basiert auf einem elektronisch steuerbaren Schwingkreisumrichter. Sie zeichnet sich durch hohe Flexibilität, einen hohen Wirkungsgrad und ein günstiges Masse-Leistungs-Verhältnis aus.

Scheibe, H.-J.; Musikowski, H.-D.: **Gestaltung der Stromversorgungseinrichtung für Plasmaspritzanlagen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 449—451, 4 Bilder, 3 Tafeln, 2 Gln., 5 Lit.

Für Entwicklung und Rekonstruktion von Plasmaspritzanlagen können sowohl Antriebsstromrichter als auch Schweißgleichrichter verwendet werden. Notwendige Modifizierungen zur Anpassung an den Prozeß sind auch durch den Anwender möglich, wobei die Lichtbogenzündung in Stickstoff zusätzliche Maßnahmen erfordert.

Rudolph, W.; Hennig, K.; Niese, S.: **Nukleare Analytik an metallischen Werkstoffen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 451—453, 5 Bilder, 1 Gln., 6 Lit.

Es wird ein Überblick über die nuklearen Analysenmethoden zur Charakterisierung metallischer Werkstoffe nach Bearbeitung mit Elektronen-, Laser-, Ionen- oder Plasmastrahlung gegeben.

Budig, P.-K.: **Der Einfluß der Verluste auf das zulässige Drehmoment stromrichtergespeister Asynchronmaschinen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 454—456, 5 Bilder, 2 Tafeln, 27 Gln., 6 Lit.

Eine qualitative Betrachtung der stromrichtergespeisten ASM zeigt, daß bei Betrieb oberhalb der Nenndrehzahl, wenn mit konstanter Klemmenspannung gearbeitet wird, die Ummagnetisierungsverluste kleiner als die bei Nennbetrieb auftretenden sind. Andererseits treten erhöhte Stromwärmeverluste vor allem im Rotor auf. In zwei untersuchten Fällen zeigt sich eine Verringerung der Gesamtverluste um 3 . . . 5 %.

Beckert, U.; Neuber, W.: **Theorie des dynamischen Verhaltens von Asynchronmotoren mit Hochstabläufer**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 457—459, 4 Bilder, 30 Gln., 6 Lit.

Es wird eine Theorie des Asynchronmotors mit Stromverdrängungsläufer im dynamischen Betrieb entwickelt.
Die Stromverdrängung wird durch eine treppenförmige Annäherung der Stromdichteverteilung in den Läuferstäben berücksichtigt.

Muschick, E.: **Elektroenergieübertragungstechnik bis zur Entscheidung für Drehstrom und ein nachträgliches Entscheidungsmodell**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 460—462, 1 Tafel, 6 Gln.

Der Aufsatz behandelt die Entwicklung der Elektroenergieversorgung in der Zeit von 1884 bis etwa 1905 und besonders die seinerzeit schwerwiegende Entscheidung zwischen Gleichstrom, Wechselstrom oder Drehstrom. Durch eine nachträgliche Formalisierung der Entscheidung der Stadt Frankfurt/a.M. wird berechnet, wie die seinerzeitige Wahl heute bewertet werden könnte. Die Schwierigkeiten technischer Entscheidungen unter Ungewißheit werden dargestellt und Vorschläge unterbreitet, wie diese überwindbar sind.

Maksymiuk, J.: **Zur Schnelligkeit von Schaltgeräten**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 463—466, 8 Bilder, 1 Tafel, 15 Gln., 8 Lit.

Die Schnelligkeit von Schaltgeräten, d.h. Kenndaten des Bewegungsverlaufes und Übertragungsgeschwindigkeit von mechanischen Leistungen und Steuerimpulsen werden dargestellt und Parameter von Draufschaltern und Kurzschließern unter Berücksichtigung der Eigenfrequenzen von Schraubenfedern behandelt.

Rößner, E.; Wicht, H.; Marx, G.: **Elektrische Entladungen in Elektrolytlösungen zur Bearbeitung und Behandlung metallischer Werkstoffe**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 12, S. 466—470, 10 Bilder, 1 Gln., 35 Lit.

Der junge Zweig der Elektrotechnologie, die Höherveredlung metallischer Werkstoffe durch Bearbeiten und Behandeln im anodischen Elektrolytplasma, ist in seinen technischen Anwendungsmöglichkeiten noch nicht ausgeschöpft. Die dargelegten Ergebnisse sind Grundlage zur Ermittlung technologischer Parameter der Verfahren.

ELEKTRIE

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, Bereich Borsdorf 7122 Borsdorf
Gestalter	*Eckhardt Natorp* (Telefon: 2870287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, 1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157 Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ustřédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 12000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače, Pošta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hà Nôi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; und Leipzig Book Service, DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29

Fortsetzung von 2. Umschlagseite

für die Automatisierung von Umspannwerken und für die Netzschutztechnik erfordert die Erforschung über die Auswirkungen von Schaltvorgängen im Bereich von 10 bis 100 MHz, auf Potentialanhebungen und damit das dynamische Verhalten von Erdungsanlagen bei Impulsstrombelastungen der genannten Frequenzen.

5. Die Netzplanung unter den Bedingungen der Ungewißheiten des Wachstums des Verbrauchs und der Anwendung neuer Techniken für die Netzsteuerung. Parallel zu den Netzplanern, die mit Invest-Entscheidungen der Zukunft bei Ungewißheiten konfrontiert werden, müssen die Betreiber ihre Netze unter ökonomischen Gesichtspunkten manchmal abweichend von ihren Auffassungen führen. Zu den Aufgaben gehören auch die Verbesserung der Methoden der Netzanalyse und die Techniken, die sowohl einen ökonomischen Betrieb als auch eine hohe Zuverlässigkeit gewährleisten.

6. Die Wiederaufnahme des Netzbetriebes nach großen Störungen (Netzzusammenbrüche)

7. Die komplexe Anwendung der SF_6-Technik für HS-Leistungsschalter und HS-Schaltanlagen, deren Verwendung für die Neugestaltung von Umspannwerken in allen Spannungsebenen für $\geqq 72{,}5$ kV, für Anlagenerweiterung bzw. Kurzschlußfestmachung von Anlagen (Uprating). Das Isolationsverhalten schwach inhomogener Isolieranordnungen bei Spannungen extrem hoher Steilheiten (fast transients), die Isolationskoordinaten von GIS (Gasisolierter Schaltanlagen). Die Erweiterung der SF_6-Technik in die Mittelspannungsbereiche mit der Besonderheit der Gestaltung von Einfachanlagen.

Im folgenden Heft folgt eine Auswertung der Berichte und Diskussionen für die einzelnen Forschungskomitees (SC's) der 31. Session. Den Teilberichten sind jeweils die drei Vorzugsthemen vorangestellt und alle Titel der vorgelegten Papers angefügt. Die Diskussionsbeiträge der DDR-Teilnehmer werden im Heft 3 und 4 veröffentlicht.

EA 2345

Prof. Dr.-Ing. Ottmar Müller
Präsident des
Nationalkomitees CIGRE der DDR

In stark bearbeiteten Auflagen

Einführung in die Technologie der Elektrotechnik / Elektronik

Von Prof. Dr. sc. techn. Hans Eigler und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Beyer. 2., stark bearbeitete Auflage. 344 Seiten, 186 Bilder, 45 Tafeln, Leinen, DDR 26,— M, Ausland 38,— DM. Bestellangaben: 5534516/Eigler, Technologie

Dieses Lehrbuch führt im Teil I in die technologischen Prozesse zur Herstellung von Bauelementen, Geräten und Anlagen der Elektrotechnik/Elektronik ein und behandelt im Teil II den Fertigungs- und Montageprozeß, seine optimale Gestaltung und Organisation und enthält auch Methoden zur mathematischen Modellierung technologischer Prozesse.
Die Auflage wurde völlig überarbeitet und z.T. neu gegliedert. Spezielle Änderungen ergaben sich vor allem dank den Fortschritten der Mikroelektronik und der weitergehenden Tendenzen zur Automatisierung. Einige Prozesse wurden neu aufgenommen.

Elektrotechnische Schaltgeräte

Von Dr.-Ing. Heinz Bätz und Dipl.-Ing. Siegfried Rutzen. 6., stark bearbeitete Auflage. 188 Seiten, 177 Bilder, 20 Tafeln, Kunstleder, DDR 14,— M, Ausland 24,— DM. Bestellangaben: 5536167/Bätz, Schaltgeräte

Fachschullehrbuch. Dargestellt werden die theoretischen Grundlagen, die technische Ausführung sowie die wichtigsten Kriterien für Auswahl und Einsatz von Nieder- und Hochspannungsschaltgeräten.
Erweitert wurden die Themen Erwärmung, Kraftwirkungen und Magnetberechnung. Neue Erzeugnisse der DDR-Schaltgeräteindustrie wurden aufgenommen.
Außer für seinen Einsatz im Fachschulstudium ist das Buch als gute Unterstützung für in der Praxis tätige Elektroingenieure geeignet, die ihre Kenntnisse über elektrotechnische Schaltgeräte auffrischen wollen.

VEM-Handbuch Die Technik der elektrischen Antriebe

Grundlagen

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Schönfeld. 8., stark bearbeitete Auflage. 560 Seiten, 457 Bilder, 97 Tafeln, Kunstleder, DDR 27,50 M, Ausland 40,— DM. Bestellangaben: 5534479/VEM-Handb. Grundlagen

Die anwendungsorientierte Darstellung vermittelt Lösungsmöglichkeiten von Aufgaben in der Antriebstechnik entsprechend dem neuesten technischen Stand.
Diese Auflage des VEM-Handbuches ist eine Neufassung, in der vor allem die durch die Mikroelektronik und die Leistungselektronik ermöglichten Fortschritte in der Antriebstechnik berücksichtigt wurden.

Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. Klaus Göldner und Prof. Dipl.-Ing. Stanislav Kubik DrSc. Hochschulreihe Theoretische Grundlagen der automatischen Steuerung. 2., stark bearbeitete Auflage. 272 Seiten, 232 Bilder, 1 Tafel, Leinen, DDR 18,50 M, Ausland 26,— DM. Bestellangaben: 5531921/Göldner, Nichtlin. Regelungen

In diesem Buch werden die wichtigsten Berechnungsverfahren nichtlinearer Systeme behandelt: die Methoden der Tangenten-, harmonischen und statistischen Linearisierung, die Analyse von Systemen in der Zustandsebene, die Theorien von Ljapunow und Popow. Dabei stehen vereinfachte Methoden, die dem Interesse des Praktikers dienen, im Vordergrund.
Die Auflage wurde gründlich überarbeitet und ergänzt. Die Darstellung der Grundlagen wurde ausgebaut. Aufgenommen wurde ein Abschnitt über praktische Verfahren zur Regelung nichtlinearer Systeme sowie ein Überblick über die Verfahren der analogen und digitalen Simulation.

Auslieferung durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

ISSN 0013–5399
ELEKTRIE · Berlin 40 (1986) 12 · S. 441–480

6730 82 177-427 465
KOMB KERAM WERKE
8612 7001 0136 PF 1

Erstauflagen

Störgrößenanalyse

Von Doz. Dr. sc. techn. Gerald Lorenz. 152 Seiten, 61 Bilder, 11 Tafeln, Kunstleder, DDR 15,50 M, Ausland 22,— DM. Bestellangaben: 5534727/Lorenz, Störgrößen

Das Buch gibt Orientierungen für die Aufgabenstellung der Störgrößenanalyse und der Methodik ihrer Durchführung sowie für Maßnahmen für die automatisierte Steuerung der Prozesse. Der umfangreiche Komplex zur Signalanalyse mit einer Reihe neuer bzw. erweiterter Verfahren geht weit über den Anwendungsbereich der Automatisierungstechnik hinaus. Der Interessentenkreis erweitert sich damit auf Ingenieure anderer Fachrichtungen, Chemiker, Physiker, Mathematiker und wissenschaftliche Mitarbeiter angrenzender Fachgebiete, die mit der Untersuchung von Signalen an technisch-physikalischen Objekten beschäftigt sind.

Angewandte Anlagenautomatisierung

Regelung thermischer Prozesse
Von Prof. Dr. sc. techn. Wolfgang Teichmann. 268 Seiten, 303 Bilder, 19 Tafeln, Leinen, DDR 28,— M, Ausland 38,— DM. Bestellangaben: 5531913/Teichmann, Anlagen

Betriebsweise, Betriebsverhalten sowie die Gestaltung technologischer Anlagen haben einen direkten Einfluß auf notwendige Regelungskonzeptionen. Am Beispiel von Dampferzeugern, Dampfturbinen, Sammelschienen- und Blockkraftwerken sowie von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen werden die Zusammenhänge zwischen dem statischen und dynamischen Verhalten wärmetechnischer Prozesse und den Aufwendungen für erforderliche Regelungseinrichtungen dargestellt. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Übergangsverhalten der jeweiligen Regelstrecken und den in der Praxis häufig angewendeten Regelungsverfahren gewidmet.
Sehr geeignet ist das Buch auch für die Studenten technischer Fachrichtungen im Hinblick auf die Gestaltung und Funktionsweise von Regelungsanlagen zur Sicherung eines technisch und ökonomisch effektiven Betriebsverhaltens der technologischen Anlagen.

Außenmontage im Maschinen- und Anlagenbau

Von einem Autorenkollektiv. Herausgegeben von Prof. Dr. sc. techn. Henning Zachau. 480 Seiten, 262 Bilder, 124 Tafeln, Kunstleder, DDR 48,— M, Ausland 48,— DM.
Bestellangaben: 5530320/Zachau, Außenmontage

Dieses Buch zeigt Mittel und Wege zur rationellen Arbeit in der konstruktiven und technologischen Vorbereitung. Bewährte Lösungen und neuere Forschungsergebnisse werden systematisiert und anwendungsbereit dargestellt.
Gliederung: Montageprozeß · Planung, Leitung und Prozeßablauf der Außenmontage · Montagegerechtes Projektieren und Konstruieren · Technologische Montagevorbereitung · Fertigungstechnische Gestaltung des Montageprozesses · Werkstoffeinsatz und Korrosionsschutz · Organisation und Lenkung der Außenmontage · Qualitätssicherung im Montageprozeß · Arbeitsgestaltung · Qualifikation der Arbeitskräfte in der Außenmontage · Erzeugnisspezifische Besonderheiten der Außenmontage.

Wickelanschlußtechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. Wolfgang Scheel und Dr.-Ing. Hans-Jürgen Albrecht. Reihe Betriebspraxis. 132 Seiten, 134 Bilder, 42 Tafeln, Broschur, DDR 13,50 M, Ausland 13,50 DM.
Bestellangaben: 5531753/Scheel, Wickelanschluß

Technologische und anwendungsbezogene Informationen über eine der progressivsten Verfahrensvarianten der lötlosen Verbindungs- und Anschlußtechnik. Darüber hinaus gibt die Broschüre Hinweise zur Substitution von Kupferschaltdrähten durch hochfeste Aluminiumwerkstoffe.
Aus dem Inhalt: Forderungen an die Wickelverbindung · Realisierungsmöglichkeiten · Verbindungsqualität und -stabilität · Bindungsmechanismus · Lebensdauer und Ausfallrate · Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Auslieferung durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN